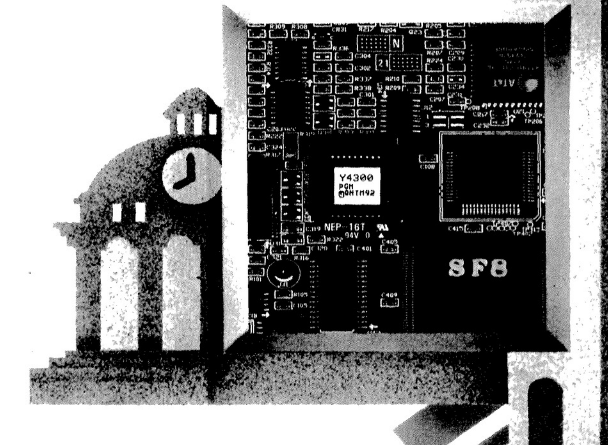


(١٦)

أشباه الموصلات

دكتور
شريف أحمد خيري

دكتور
حسن حسين حسن





سلسلة الفكر العربي
لمراجع العلوم الأساسية
- ١٦ -

أشبـــــاه الموصــــلات

دكتور
شريف أحمد خيرى
أستاذ الفيزياء بكلية العلوم - جامعة القاهرة

دكتور مهندس
حسن حسين حسن
أستاذ مساعد بالمعهد العالي للتكنولوجيا ببنها

الطبعة الأولى
١٤٢٢هـ / ٢٠٠٢م

ملتزم الطبع والنشر
دار الفكر العربى
٩٤ شارع عباس العقاد - مدينة نصر - القاهرة
ت : ٢٧٥٢٩٨٤، ٢٧٥٢٩٨٤، فاكس: ٢٧٥٢٧٣٥
www.darelfikrelarabi.com
INFO@darelfikrelarabi.com

٥٣٧,٦٢٢ شريف أحمد خيرى.
ش ر ا ش أشباه الموصلات/ شريف أحمد خيرى، حسن حسن حسن. - القاهرة: دار الفكر العربى، ٢٠٠٢م .
٤٣٠ ص : إيض ، ٢٤ سم. - (سلسلة الفكر العربى لمراجع العلوم الأساسية؛ ١٦)
ببليوجرافية : ص ٤٠٥ - ٤٠٦ .
يشتمل على كشاف بالمصطلحات.
يشتمل على ملاحق.
تدمك: ٤-١٤٣٣-١٠-٩٧٧.
١ - الفيزياء. ٢- الإلكترونات. أ- حسن حسن حسن، مؤلف مشارك. ب- العنوان. جـ- السلسلة.

تصميم وإخراج فنى

منى حامد عمارة

&

ثريا إبراهيم حسين



تقديم السلسلة

الحمد لله رب العالمين . . خلق الإنسان، علّمه البيان،

والصلاة والسلام على أشرف المرسلين، سيدنا محمد النبى الأمى العربى الصادق الأمين، وعلى آله وصحبه والتابعين بإحسان إلى يوم الدين.

أما بعد،

فإن اللغة - أىّ لغة - هى وسيلة التواصل الفكرى بين أبناء الأمة الواحدة، وهى فى الوقت نفسه تمثل حاجة ملحّة، وضرورة لا غنى عنها لكل أمة تشرع فى النهوض من كبوتها وتسعى إلى اللحاق بركب الحضارة، مؤمنة بالدور الأساسى للعلوم الأساسية والتطبيقية والتقنية فى صنع التقدم والرقى.

هذه الحقيقة التاريخية استوعبها علماء الحضارة العربية الإسلامية عندما ترجموا معارف السابقين إلى اللغة العربية، واستوعبها أيضا الغربيون عندما ترجموا علوم الحضارة العربية الإسلامية فى أوائل عصر النهضة الأوربية الحديثة، وتعيها اليوم كل الأمم التى تدرس العلوم بلغاتها الوطنية، فى سعى حثيث نحو المشاركة الفعالة فى إنتاج المعرفة وتشييد صرح الحضارة المعاصرة.

ولقد أضحى أمر تعريب العلم والتعليم ضرورة من ضرورات النهضة العلمية والتقنية التى تنشدها أمتنا العربية الإسلامية لكى تستأنف مسيرتها الحضارية بلغة القرآن الكريم الذى حفظها قوية حية فى النفوس على الرغم من الوهن الذى أصاب أهلها، وما ذلك إلا لأن الله - سبحانه وتعالى - قد خصّها بصفات تميزها على غيرها، وكفلها بحفظه حين تكفّل بحفظ قرآنه العظيم.

والحديث عن هذه الضرورة الحضارية لتعريب العلم والتعليم قد تجاوز الآن مرحلة الإقناع بالأدلة والبراهين المستقاة من حقائق التاريخ ومعطيات الواقع المعاش، وعليه أن ينتقل إلى مرحلة التخطيط والتنفيذ، وفق أسس وضمانات منهجية مدروسة، وعن طريق آليات ومؤسسات قادرة على إنجاز المشروع الحضارى الكبير؛ ذلك أن اجتيار حالة التخلف العلمى والتقنى التى تعيشها الأمة العربية والإسلامية يجب أن يصبح هدفا عزيزا تُستحث لأجله الهمم، وتستثار العزائم.

ودار الفكر العربي ـ من جانبها ـ قد استشعرت خطورة تأخير هذا المشروع الحضارى الكبير، فسعت جاهدة إلى تحقيق الهدف النبيل، وشرعت فى إعداد **«سلسلة مراجع العلوم الأساسية»** فى مجالات الكيمياء والفيزياء والرياضيات والفلك والچيولوچيا وعلوم الحياة، بحيث تخاطب قارئ العلوم فى مراحل العمر المختلفة بصورة عامة، وطلاب المرحلتين الثانوية والجامعية على وجه الخصوص، فى ضوء الأهداف الآتية:

* ربط المادة العلمية بما يدرسه الطلاب فى مناهجهم الدراسية، وعرضها على نحو يوافق التصور الإسلامى للمعرفة، ويحقق أهداف وغايات التربية الإسلامية الرشيدة.
* إثراء الثقافة العلمية لدى الطلاب والارتقاء بذوقهم العلمى مع تنمية الجانب التجريبى والتطبيقى لتعويدهم حسن الاستفادة من كل ملكات الفكر والعمل التى وهبها الله ـ سبحانه وتعالى ـ للإنسان.
* إبراز الدور الرائد الذى قام به علماء الحضارة العربية الإسلامية ـ قديما وحديثا ـ فى دفع مسيرة التقدم العلمى.
* تتبع نمو المفاهيم العلمية وصولا إلى أحدث الكشوف والمخترعات، وذلك بهدف غرس منهجية التفكير العلمى لدى الطلاب، وتوسيع مداركهم إلى أبعد من حدود الموضوعات الدراسية المقررة عليهم.
* الالتزام بما أقرته مجامع اللغة العربية من مصطلحات علمية، ويفضل أكثرها شيوعا مع ذكر المقابل الأجنبى.

وقد عهدت **دار الفكر العربي** بالمسئولية العلمية إلى هيئة استشارية تتولى التخطيط لإصدارات هذه السلسلة، واستكتاب أهل الخبرة والاختصاص من علماء الأمة ومفكريها، ومناقشة الأعمال المقدمة قبل صدورها.

﴿ربَّنا لا تُزغْ قُلُوبنا بعْد إذْ هديْتنا وهبْ لنا من لدُنك رحْمةً إنَّك أنت الْوهَّابُ ۝٨﴾ [آل عمران].

وآخر دعوانا أن الحمد لله رب العالمين

احمد فؤاد باشا

جميع المراسلات والاتصالات على العنوان التالى:

دار الفكر العربى

سلسلة الفكر العربي لمراجع العلوم الأساسية

٩٤ شارع عباس العقاد - مدينة نصر - القاهرة

ت: ٢٧٥٢٩٨٤ - فاكس: ٢٧٥٢٧٣٥

www.darelfikrelarabi.com
INFO@darelfikrelarabi.com

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدمة

بسم الله الرحمن الرحيم، الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على أشرف المرسلين وعلى آله وصحبه أجمعين وبعد.

حققت صناعة أشباه الموصلات فى العقدين السابقين نموا طفريا غير مسبوق، جعلها الصناعة الأكبر بين كافة الصناعات الأخرى عالميا. وأصبحت هذه الصناعة هى القاطرة التى تقود قطاع التكنولوچيا المتقدمة (High-Tec) فى الاقتصاد العالمى. ولم تنل الأمة العربية نصيبها من هذه الصناعة الإستراتيچية. ويمكنها أن تشارك فيها بقوة، إذا توفّر لديها الخريج المتدرب تكنولوچيا على مستوى عال بالمعايير الدولية. فوحدة الإنتاج لأشباه الموصلات والتى تسمى بالفاب (FAB) تتطلب نمطيا استثمارا فى حدود مليار أو أكثر من الدولارات وتوظف حوالى مائة فنى متخصص، مستوى تدريبهم التكنولوچى يصل إلى درجة ماچستير، وإنتاجية الشخص الواحد سنويا حوالى مليون دولار ومتوسط راتبه السنوى مائة ألف دولار. وتنتشر هذه الوحدات ليس فقط بأمريكا واليابان ولكن فى دول أخرى صغيرة مثل ماليزيا وإسرائيل وذلك باستثمارات أجنبية.

إذن مطلوب بشدة أن نُرغّب العديد من شباب أمتنا العربية فى أن ينهلوا من موارد هذه الثقافة التكنولوچية الحديثة وأن يزداد نصيب مكتباتنا العربية من المراجع التكنولوچية باللغة العربية جنبا إلى جنب مع المراجع الأجنبية، ومن هنا يجيء دور هذا الكتاب كإضافة للمكتبة التكنولوچية العربية.

وحين فكرنا فى إعداد هذا الكتاب استعرضنا عددا من المراجع فى هذا المجال واسترعى انتباهنا مرجعين هما «أساسيات نبائط أشباه الموصلات» لمؤلفه R. F. Pierret المنشور عام 1996 والآخر هو «الفيزياء الأساسية لنبائط أشباه الموصلات» لمؤلفه G. Parker والمنشور عام 1994. استخدم هذين الكتابين كمرجعين لتدريس أشباه الموصلات لطلاب الفيزياء والهندسة الكهربية ببعض المعاهد والكليات المصرية. المرجع الأول (بيير) هو أساس الفصول الأربعة الأولى للكتاب. ويتم استخدامه فى عدد من الجامعات الأمريكية كمرجع أساسى كما اتضح لنا عند تصفح مواقع هذه الجامعات على الشبكة العنكبوتية بالإنترنت .

الفصول الأربعة الأخيرة من كتابنا خصصت لتطبيقات أشباه الموصلات، فيما يعرف بالنبائط Devices وأساس هذه الفصول هو المرجع الثانى (باركر) الذى يمتاز عن

غيره بالعرض الفيزيائى المتميز والموجز لطريقة عمل النبائط الرئيسية وبما يشتمله من الأمثلة العديدة المفيدة.

تنظيم هذا الكتاب يسير على النحو التالى: يعرض الفصل الأول التصنيفات والتركيبات البلّورية لأشباه الموصلات ويليها كيفية تصنيع بلورة سيليكون فائقة النقاء. ويتناول الفصل الثانى نموذجين لحاملات الشحنة: الروابط ونطاق الطاقة وكيفية حساب أعداد حاملات الشحنة بشبه الموصل. ويختص الفصل الثالث بفاعليات حاملات الشحنة من تيار انسياق وتيار انتشار وعمليات توليد والتئام الحاملات. ثم تدمج كل هذه الفاعليات فيما يسمى بمعادلة الحالة، وتناقش بعض حلول هذه المعادلة الهامة. والفصل الرابع وصفى تماما ويمكن تكليف الطلاب بقراءته اعتمادا على أنفسهم فقط، ويتناول هذا الفصل العمليات الأساسية المستخدمة فى تصنيع نبيطة شبه موصل. ويتعرض الفصل الخامس لأساسيات الوصلة *pn* والتى تشكل اللبنة الأساسية لعديد من النبائط. من بين كل النبائط يوجد حصانان يقومان بمعظم العمل وهما الترانزيستور الثنائى القطبية وترانزيستور تأثير المجال. الفصل السادس يستعرض بناء وكيفية عمل ترانزيستور الثنائى القطبية فى أنماط العمل المختلفة مع ربط أداء هذا الترانزستور مع الخصائص الفيزيائية لمادة شبه الموصل بداخله. بعد دراسة ثنائى MOS، يستخدم الفصل السابع هذه الدراسة لفهم عمل الترانزيستور MOSFET وهو النبيطة الأكثر شيوعا بين كل النبائط كافة. نوقش مفهوم تصغير أبعاد هذا الترانزيستور، عمليات التصغير تؤدى إلى وضع ملايين الترانزيستورات على مساحة لا تتعدى مساحة طابع بريد. أما الفصل الثامن والأخير فيتناول عددا من نبائط الإلكترونيات البصرية مثل ثنائى باعث الضوء LED والكواشف البصرية فالخلية الشمسية وأخيرا ثنائى الليزر.

نسأل الله العلى القدير أن يجعل هذا العمل نافعا ونأمل أن يوجهنا القارئ الكريم لأى ملاحظة يرى إضافتها لهذا الكتاب بالاتصال عبر أحد عناوين البريد الإلكترونى التالية :

hhh @ menanet.net

khairysh @ hotmail.com

هذا، وبالله التوفيق - وآخر دعوانا أن الحمد لله رب العالمين.

شريف خيرى

حسن حسين

سبتمبر ٢٠٠١

المحتويات

الفصل الأول
أشباه الموصلات - مقدمة عامة

الفصل الثاني
نمذجة حاملات الشحنة الكهربية

الفصل الثالث
حاملات الشحنة

الفصل الرابع
أساسيات تصنيع النبائط

الفصل الخامس
الوصلة الثنائية

الفصل السادس
الترانزيستور ثنائى القطب

الفصل السابع

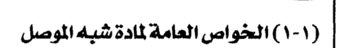
النبيطة (فلز - أكسيد فلز - شبه موصل)

الفصل الثامن
الإلكترونيات البصرية

الفصل الأول

أشباه الموصلات - مقدمة عامة

SEMICONDUCTORS GENERAL INTRODUCTION



(١-١) الخواص العامة لمادة شبه الموصل
General Semiconductor Material Properties

لم يعد يخفى على أحد أن الغالبية العظمى من نبائط الحالة الجامدة الموجودة بالأسواق فى هذا العصر يتم تصنيعها من مواد يقال لها أشباه الموصلات؛ ولذا فمن البديهى أن نستهل هذا الكتاب باستعراض الطبيعة العامة للمواد شبه الموصلة.

١-١-١ التركيب Composition

يحوى الجدول (١-١) قائمة بالتركيب الكيميائى لأشباه الموصلات التى قد يجىء ذكرها فى أدبيات النبائط.

نلاحظ أن عائلة أشباه الموصلات تحوى العناصر المفردة مثل: السيليكون Si والجرمانيوم Ge، والمركبات مثل: Ga As (زرنخيد الجاليوم)، و Zn Se (سيلينيد الزنك)، وكذلك السبائك مثل: $Al_xGa_{1-x}As$ (العدد x فى صيغة السبيكة- وأحيانا y- عبارة عن كسر محصور بين الصفر والواحد ويساوى نسبة العنصر فى السبيكة مقاسا بالمول). يعتبر السيليكون شبه الموصل الأكثر أهمية على الإطلاق، ويعود ذلك أساسا للتطور الهائل فى تقنية صناعته، ويدخل فى تصنيع السواد الأعظم من النبائط سواء المنفردة منها أو ما بداخل الدارات المتكاملة (ICs) التى هى عماد الأجهزة الإلكترونية مثل الكمبيوتر والتليفزيون. أو دوائر التحكم بالإشعال فى السيارات الحديثة. أما زرنخيد الجاليوم GaAs الذى يتألق من حيث خفة انتقال الإلكترونات داخله أو من ناحية خواصه الضوئية فيستخدم في صناعة الدارات المتكاملة فائقة السرعة ودايودات (ثنائيات) الليزر. وتستخدم باقي أشباه الموصلات في تطبيقات خاصة مثل تلك المرتبطة بالسرعة العالية أو بدرجة الحرارة العالية أو بالبصريات الإلكترونية. وسنركز أساسا في هذا الكتاب على السيليكون؛ لأنه شبه الموصل الأكثر شيوعا في صناعة أشباه الموصلات ويليه في ذلك زرنخيد الجاليوم.

بالرغم من أن قائمة أشباه الموصلات تبدو كبيرة إلا أنها في الحقيقة تعتبر محدودة بالقياس بالقائمة الكاملة للعناصر والمركبات، فإذا نظرنا للجزء الخاص بأشباه الموصلات في الجدول الدوري للعناصر (جدول ١-٢) سنجد أن مجموعة معينة من العناصر ومركبات من عناصر معينة هي التي تعتبر أشباه موصلات. من الجدولين ١، ٢ نجد أنه يوجد عنصران فقط يعملان كأشباه موصلات: السيليكون، والجرمانيوم، وهما من العمود الرابع والباقي مركبات إما لعناصر من العمود الثالث مع الخامس مثل GaAs وتسمى مركبات III-V أو مركبات لعناصر من العمود الثاني مع السادس مثل ZnS

جدول (١-١) مواد أشباه الموصلات

Table 1.1 Semiconductor Materials.

General Classification التصنيف	*Semiconductor* *Symbol* الرمز	*Name* الاسم	
(1) Elemental	Si	Silicon	العناصر
	Ge	Germanium	
(2) Compounds			
(a) IV-IV	SiC	Silicon carbide	المركبات
(b) III-V	AlP	Aluminum phosphide	
	AlAs	Aluminum arsenide	
	AlSb	Aluminum antimonide	
	GaN	Gallium nitrite	
	GaP	Gallium phosphide	
	GaAs	Gallium arsenide	
	GaSb	Gallium antimonide	
	InP	Indium phosphide	
	InAs	Indium arsenide	
	InSb	Indium antimonide	
(c) II-VI	ZnO	Zinc oxide	
	ZnS	Zinc sulfide	
	ZnSe	Zinc selenide	
	ZnTe	Zinc telluride	
	CdS	Cadmium sulfide	
	CdSe	Cadmium selenide	
	CdTe	Cadmium telluride	
	HgS	Mercury sulfide	
(d) IV-VI	PbS	Lead sulfide	
	PbSe	Lead selenide	
	PbTe	Lead telluride	
(3) Alloys			السبائك
(a) Binary	$Si_{1-x}Ge_x$		ثنائية
(b) Ternary	$Al_xGa_{1-x}As$	(or $Ga_{1-x}Al_xAs$)	ثلاثية
	$Al_xIn_{1-x}As$	(or $In_{1-x}Al_xAs$)	
	$Cd_{1-x}Mn_xTe$		
	$GaAs_{1-x}P_x$		
	$Ga_xIn_{1-x}As$	(or $In_{1-x}Ga_xAs$)	
	$Ga_xIn_{1-x}P$	(or $In_{1-x}Ga_xP$)	
	$Hg_{1-x}Cd_xTe$		
(c) Quaternary	$Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$		رباعية
	$Ga_xIn_{1-x}As_{1-y}P_y$		

جدول (١-٢) الجزء الخاص بأشباه الموصلات

في الجدول الدوري للعناصر

دورة Period	عمود Column II	III	IV	V	VI
2		B بورون Boron	C كربون Carbon	N نتروجين Nitrogen	
3	Mg مغنسيوم Magnesium	Al الومنيوم Aluminum	Si سيليكون Silicon	P فوسفور Phosphorus	S كبريت Sulfur
4	Zn زنك Zinc	Ga جاليوم Gallium	Ge جيرانيوم Germanium	As زرنيخ Arsenic	Se سيلينيوم Selenium
5	Cd كادميوم Cadmium	In إنديوم Indium	Sn قصدير Tin	Sb أنتيمون Antimony	Te تيللور Tellurium
6	Hg زئبق Mercury		Pd رصاص Lead		

وتسمى مركبات II-VI، ويوجد مركب شبه موصل وحيد لعنصرين من العمود الرابع الا وهو كربيد السيليكون SiC، ويلاحظ في المركبات التي ذكرناها إلى الآن أن مجموع عمودي عنصري المركب يساوي 8. غير أن هناك استثناء لهذه القاعدة في المركبات من عنصر الرصاص (العمود الرابع) مع عناصر من العمود الخامس مثل كبريتيد الرصاص PbS، وسيلنيد الرصاص PbSe وتيللوريد الرصاص PbTe وتسمى هذه المجموعة بالمركبات IV-VI. بالإضافة للعناصر والمركبات المذكورة توجد مجموعة ثالثة تسمى بالسبائك شبه الموصلة. تتكون السبيكة من نوعين مختلفين من بعض أشباه الموصلات التي سبق ذكرها، مثلا، السبيكة المكونة من AlAs و GaAs (وهما مركبات III-V) تسمى بالسبيكة $Al_xGa_{1-x}As$ وفيها نسبة عدد ذرات الألومنيوم إلى عدد ذرات الجاليوم هي x إلى 1-x.

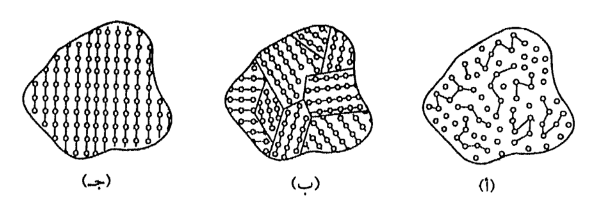
١-١-٢ النقاء Purity

سنعرف في الفصل الثاني أن إضافة آثار ضئيلة من ذرات شائبة ما إلى شبه الموصل ستؤدي إلى تغييرات هائلة بالخواص الكهربية للمادة (تسمى هذه العملية بالإشابة -أو التطعيم- Doping)؛ لهذا السبب يجب التحكم بدقة متناهية فى نقاء مكونات أشباه الموصلات، وليس مستغربا أن ندرك بأن معرفة الإنسان بأشباه الموصلات هى حديثة نسبيا ولم تنطلق إلا بعد أن تعلم الإنسان كيفية تصنيع أشباه الموصلات بنقاء عال

جدا فى النصف الثانى من القرن العشرين. وتعتبر أشباه الموصلات الحديثة هى أنقى المواد المعروفة على الإطلاق، فمثلا فى سيليكون النبائط الحديثة نسبة الشوائب الطبيعية غير المتعمدة لا تتجاوز عادة ذرة واحدة لكل ألف مليون ذرة (وهى نفس النسبة بين مجموعة من خمسة أشخاص فقط إلى مجموع سكان العالم بأكمله). يجب أن نؤكد هنا أن هذه النسبة للشوائب غير المتعمدة، أما الشوائب التى تضاف عن قصد فتتراوح النسبة بين ذرة شائبة لكل 10^8 ذرة سيليكون إلى ذرة شائبة لكل ألف ذرة سيليكون، والقصد من هذه الإشابة هى التحكم فى الخواص الكهربية للسيليكون على النحو الذى سيتم تفصيله فيما بعد.

١-١-٣ البنية Structure

يلعب الترتيب الفراغى لمواضع الذرات داخل المادة دورا هاما فى تحديد الخواص الدقيقة لهذه المادة. وكما هو موضح بالشكل (١-١)، فإن ترتيب الذرات داخل الجوامد يمكن أن يصنف كأحد ثلاثة أصناف: لابلّورى Amorphous، متعدد البلّورة Polycrystalline، أو بلّورى Crystalline. فى حالة الجامد اللابلّورى لا يمكن التعرف على ترتيب منتظم للذرات وتكون مواضعها عشوائية ولا تخضع لترتيب معين، بينما نجد ترتيب الذرات فى المادة البلّورية محكما حيث تصطف الذرات فيها بانتظام فى ثلاثة أبعاد. ويتكرر ترتيب الذرات بمقطع ما، فى كل المقاطع الأخرى على طول البلورة بطريقة دورية.



شكل (١-١) التصنيف العام للمواد طبقا للترتيب الذرى

(أ) أمورفية - لا نتعرف على ترتيب بعيد المدى للذرات.

(ب) متعددة البلّورة - الترتيب كامل داخل الحبيبات فقط.

(جـ) متبلورة - جميع ذرات الجامد تصطف بانتظام.

تقع الجوامد متعددة البلّورة بين الجوامد اللابلّورية والبلّورية، ففى الجوامد متعددة البلّورة تنتظم مواضع الذرات داخل مناطق صغيرة تسمى بالحبيبات، لكن لا يوجد تشابه بين اتجاهات اصطفاف الذرات فى حبيبة ما والحبيبات المجاورة.

عند إمعان النظر فى المواد المكونة لنبائط الحالة الجامدة الموجودة حاليا سنجد أمثلة على كل نوع من أنواع البنيـة البلّورية، فمـثلا فى شـاشات البلّورات السـائلة (LCD) سنجـد أن ترانزستـورات فصل -توصـيل الجهـد الكهربى لعناصـر الشاشـة تصنع من السيليكون اللابلّورى، وأن السيليكون المتعدد البلّورة يستخدم فى بوابات ترانزيستور تأثير المجال فلز - أوكسيد -شبه موصل (MOSFET)، لكن فى الغالبية العظمى للنبائط نجد أن المناطق النشطة بالنبيطة موجودة داخل سيليكون بلوري؛ لذا يصنع السواد الأعظم من النبائط فى وقتنا الحالى من أشباه الموصلات البلورية.

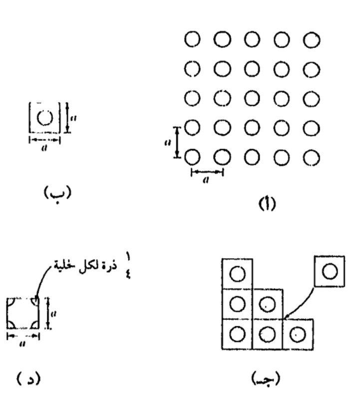
(١-٢) بنية البلّورة Crystal Strucuture

عرفنا فى الفقرة السابقة مدى أهمية أشـباه الموصلات البلّورية بالنسبة للنبائط شبه الموصلة؛ لذا من الطبيعى أن نـبحث عن معلومات إضافيـة عن الحالة البلّورية. وهدفنا الرئيـسى هنا سـيكون إعطاء صـورة أكثـر تفـصيـلا عن ترتيب الذرات بـداخل أشبـاه الموصلات الرئيـسية، ولتـحقيق هذا الـهدف يجب أن نتعـرف أولا على كيفـية وصف مـواضع الذرات داخل البلّورة، بعـد ذلك سنتـدرب على ممارسة نـوع من «التصـوير» للشبيكة lattice ثلاثية الأبعـاد -أى ترتيبها الذرى- وذلك قـبل التعرض لشبيـكة شبه الموصل نفسها، ثم نختـتم هذا الجزء بالتعرف على أدلة ميللر Miller indices وهى فى الحقيقة عبارة عن رموز مختصرة تستخدم لتحديد المستويات والاتجاهات داخل البلّورة.

١-٢-١ مفهوم الخلية الوحدة The Unit Cell Concept

يمكن التعبـير عن الخلية الوحدة ببـساطة بانها ذلك الجزء الصـغير من أى بلّورة، الذى يمكن استخدامـه لإعادة بناء هذه البلّورة. ولتوضيح مفهـوم الخلية الوحدة (أو لبنة البناء) دعونا نلقى نظرة على الشبيكة ثنائيـة الأبعاد المبينة بالشكل (١-٢ أ) لكى نضيف هذه الشبيكة أو لكى نحـدد خصائصها الفيـزيائية نلجأ إلى خلية وحدة كـتلك الموضحة بالشكل (١-٢ ب)، وكما هـو موضح بـالشـكل (١-٢جـ) يمكن بناء الشـبيكة الأصلية بتكرار خلية الوحدة ورصها جنبا إلى جنب مع مثيلاتها بطريقة منظمة.

وعادة ما ينشأ نوع من الالتـباس وعدم الفهم فيما يـختص بخلايا الوحدة وذلك لسبـبين؛ الأول: هو أن خلية الوحـدة قد تأخذ أكـثر من شكل، فمـثلا خليـة الوحدة



شكل (١-٢) مقدمة لطريقة الخلية الوحدة لوصف الترتيبات الذرية داخل البلّورات
(أ) عينة لشبيكة ثنائية الأبعاد. (ب) خلية الوحدة المناظرة للشبيكة فى الجزء (أ).
(جـ) إعادة إنتاج الشبيكة الأصلية . (د) خلية وحدة بديلة.

بالشكل (١-٢ د) تعتبر مقبولة تماما مثلها مثل الموجودة بالشكل (١-٢ب)، والسبب الثانى: هو أن خلية الوحدة ليست بالضرورة هى الخلية الابتدائية primitive (الخلية الابتدائية هى أصغر خلية وحدة ممكنة). ففى كثير من الأحيان نجد أن خلية وحدة جوانبها متعامدة تكون مناسبة أكثر من ناحية التصور عن خلية ابتدائية جوانبها مائلة، وبالذات فى الشبيكات ثلاثية الأبعاد يصبح من الصعب تخيل بنائها من وحدات خلايا غير مكعبة.

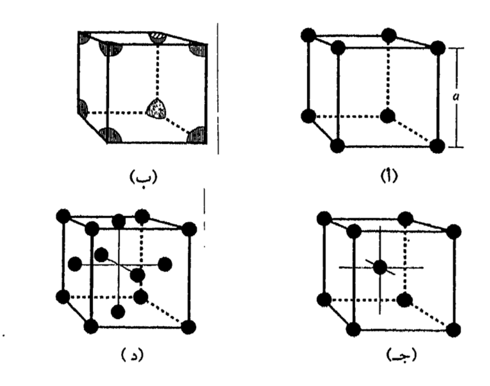
١-٢-٢ خلايا وحدة بسيطة ثلاثية الأبعاد Simple 3-D Unit Cells

البلّورات شبه الموصلة هى ثلاثية الأبعاد؛ ولذلك تكون خلايا الوحدة لها أيضا ثلاثية الأبعاد. يوضح الشكل (١-٣ أ) أبسط خلية وحدة ثلاثية على الإطلاق وتسمى بخلية الوحدة المكعبية البسيطة simple cubic، وهى عبارة عن مكعب يوجد فى كل ركن من أركانه ذرة واحدة. يمكن إنشاء الخلية الوحدة للشبيكة المكعبة البسيطة بنفس الأسلوب الذى شاهدناه فى الشبيكة المربعة ثنائية الأبعاد، مع ملاحظة أن ثُمن (وليس

ربع) ذرة سيكون بداخل كل ركـن من أركان المكعب كمـا هو مبين بالشكل (١-٣ب)، بتكرار رص الخلية الوحدة مع مثيلاتها نحصل على الشبيكة المكعبة.

بعد إكمال تراص خلايا الوحدة سنجد أننا بإزاء مـستويات متوازية كل منها يشبه الشكل (١-٢ أ). وتكون المسافة الفـاصلة بين مستويين متـجاورين هى نفس طول ضلع خلية الوحدة، وتسمى بثابت الشبيكة **lattice constant** ونرمز له بالحرف **a**.

يبين الشكلان (١-٣جـ)، و(١-٣ د) خـلايا ثلاثية الأبعاد شـائعة جدا، مـقاربة للخلية المكعب البـسيط. الخلية فى الشكل (١-٣جـ) هى مكعب بسيط بعـد إضافة ذرة واحدة بمركـز المكعب وتسمـى بخلية المكعب المتـمركـز الجسم **body centered cubic**، **(bcc)** أمـا الخليـة فى الشكـل (١-٣ د) فـهـى مكعـب بسـيط بعـد إضـافـة ذرة واحـد بكـل مركـز وجـه من أوجهـه السـتة وتسمـى بخـلية المكعب المتمركـز الوجه **face centered cubic (fcc)**.



شكل (١-٣) خلايا وحدة بسيطة ثلاثية الأبعاد

(أ) خلية وحدة مكعبة بسيطة *sc*.

(ب) خلية وحدة مكعبة بسيطة وصحيحة حرفيا فكل ركن به $\frac{1}{8}$ ذرة فقط

(جـ) خلية وحدة مكعبة متمركزة جسميا *bcc*.

(د) خلية وحدة مكعبة متمركزة وجهيا *fcc*.

لاحظ أن نصيب المكعب المتمركز الوجه من ذرة مركز الوجه هو النصف فقط؛ لأن النصف الآخر يكون من نصيب المكعب المجاور. لنحاول الآن حساب عدد الذرات بكل خلية على حدة، ففى المكعب البسيط توجد ذرة واحدة تجىء من ثمانية أركان المكعب، فى كل ركن يوجد ثُمن ذرة فقط. فى المكعب المتمركز الجسم توجد ذرتان: واحدة من الأركان والأخرى من المركز. أما المكعب المتمركز الوجه فيحوى أربعة ذرات فقط: واحدة من الأركان وثلاثة من الأوجه الستة للمكعب بحيث يحوى كل وجه نصف ذرة فقط، وعلى القارئ أن يمعن النظر بالشكل (١-٣) ليتحقق من صحة حساباتنا. وهنا لا بد أن نذكر أن شبكة الإنترنت تحوى العديد من برامج المحاكاة المتحركة للبلّورات المختلفة والتى تمكن المشاهد من مشاهدة خلايا الوحدة وهى تدور حول نفسها. للوصول لهذه البرامج، لقن هذه الكلمات لمحرك البحث «crystal structure animation».

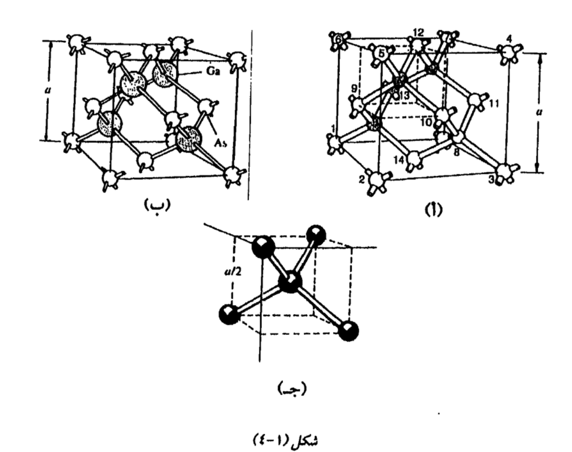
١-٢-٣ شبيكات أشباه الموصلات Semiconductors Lattices

وصلنا الآن لمرحلة تمكننا من النظر لتفاصيل مواضع الذرات فى أشباه الموصلات الأساسية. البنية البلّورية للسيليكون (والجرمانيوم) توصف بواسطة خلية الوحدة كالموضحة بالشكل (١-٤ أ). تسمى هذه الخلية بخلية الماس؛ لأنها تصف بلورة الماس diamond الذى هو أحد أشكال عنصر الكربون.

يقع الكربون مع السيليكون والجرمانيوم فى العمود الرابع للجدول الدورى. عند فحص خلية الوحدة الماسية نجدها مكعبة. وفيها ذرة بكل ركن وبكل مركز وجه كما فى المكعب متمركز الوجه. لكن بداخل الخلية توجد أربع ذرات أخرى كما بالشكل (١-٤ أ). توجد إحدى هذه الذرات الأربعة على قطر جسم المكعب وعلى مسافة ربع قطر من ذرة الركن العلوى الأمامى الأيسر. مواضع باقى الذرات الأربعة مزاحة فى نفس الاتجاه وبنفس المسافة -أى ربع قطر جسم المكعب- من مراكز الأوجه: العلوى، الأمامى، والأيسر. (ملحوظة - طول قطر المكعب هو $\sqrt{3}\,a$ وطول قطر الوجه هو $\sqrt{2}\,a$، حيث a هو طول ضلع المكعب) الشبيكة الماسية هى عبارة عن شبيكتين مكعبتين متمركزى الوجه إحداهما مزاحة بمسافة ربع قطر عن الأخرى فى اتجاه قطر جسم المكعب. قد لا يبدو ذلك واضحا فى الشكل (١-٤ أ) ولكن الذرات عند أركان وأوجه المكعب تنتمى للشبيكة fcc الأولى بينما ذرات الداخل تنتمى للشبيكة fcc المزاحة ربع قطر عن الشبيكة الأولى.

تتبلور معظم أشباه الموصلات III-V ومن بينها GaAs فى بنية الزنكبلند zincblende وتعتبر شبيكة الزنكبلند وخير مثال لها هى خلية وحدة شبه الموصل

GaAs المبينـة بالشكل (١-٤ ب)- مماثلة للشبـيكة الماسيـة. الفرق الوحـيد بينهـما أن الذرات كلها من نوع واحد (الكربون) فى الشـبيكة الماسية أما فى شـبيكة الزنكبلند فإن ذرات الخلية fcc الأولى من عنصر بالعمود الثالث وذرات الخلية المزاحة بربع قطر تنتمي للعمود الخامس، فى حالة GaAs تحتل ذرات Ga شبيكة fcc الأولى وتسكن ذرات As فى الشبيكة fcc المزاحة.



شكل (١-٤)

(أ) خلية وحدة ماسية.

(ب) خلية وحدة زنكبلند (استعمل GaAs كمثال).

(جـ) الركن العلوى للخلية فى الجزء (أ) مكبر للتأكيد على الأربع أقرب روابط طول ضلع المكعب a يساوى $5.43Å$ فى السيليكون و $5.65\ Å$ في $GaAs$ عند $T=300K$.

بعـد أن عرفنا مـواضع الذرات فى أشبـاه الموصـلات الرئيسـية قـد نتسـائل عن الاستخـدام العملى لهذه المعرفة. نعم توجد بـعض التطبيقات وربما أكثرها مـباشرة هى الحسـابات الهندسية المتـعلقة بخلية الوحـدة. فمثلا عند درجـة حرارة الغرفـة فإن ثابت الشبيكة a للسيليكون هو 5.43 Å (الإنجشتروم Å يساوى 10^{-8}cm)، وحيث إنه يوجد

بكل خلية وحدة 8 ذرات سيليكون (4 لكل خلية وحدة fcc)، وبالتالى يوجد فى كل سم مكعب ($8/a^3$) ذرة سيليكون أى حوالى 5×10^{22} ذرة لكل سم مكعب. ويمكن إجراء حسابات مشابهة لأنصاف الأقطار الذرية، وللمسافات بين المستويات فى الشبيكة، وهكذا. لكن علينا أن نذكر هنا أن السبب الرئيسى لتحليل شبيكة شبه الموصل على هذا النحو من التفصيل هو أن نمهد لحقيقة هامة يوضحها شكل (١-٤ جـ) وهى **«أنه يوجد لكل ذرة شبه موصل شبيكته ماسية أو زنكبلند، أربعة من الجيران الأكثر قربا»**، وبالتالى فإن الرابطة الكيميائية (أى غراء البلّورة) هى بالأساس ذرة ترتبط بأربعة ذرات من أقرب الجيران، وسندخر هذه الحقيقة الهامة لاستعمالها لاحقا بالفصل القادم.

مثال ١-١ :

إذا كان ثابت الشبيكة فى السيليكون هو $a = 5.43 \times 10^{-8}$ cm، ما هى المسافة d بين ذرة سيليكون وأقرب ذرة لها؟

الحل :

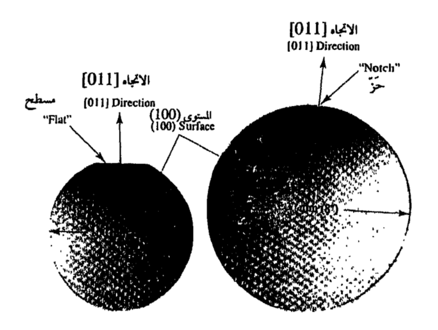
كما هو مبين بالشكل (١-١٤) المسافة بين الذرة فى الركن العلوى الأمامى وأقرب جيرانها هو ربع قطر جسم، وبما أن قطر الجسم للمكعب من فيثاغورث هو $\sqrt{3}\,a$ إذن:

$$d = \frac{\sqrt{3}\,a}{4} = \frac{\sqrt{3}\,(5.43 \times 10^{-8})}{4} = 2.35 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

١-٢-٤ أدلة ميللر Miller Indices

تأخذ بلّورات السيليكون المستخدمة فى تصنيع النبائط شكل قرص دائرى رقيق السمك كالمبينة بالشكل (١-٥) هذه الأقراص المصورة هنا والتى تعرف برقائق السيليكون Si wafers هى المادة الخام التى يبدأ بها المصنعون الرئيسيون تصنيع النبائط، ويهمنا هنا أن نذكر أن سطح الرقاقة يتم تجهيزه مسبقا بعناية ليكون موازيا لمستوى بلّورى معين. كما أنه توضع على الرقاقة علامة عن طريق قطع جزء مستوى أو آخر مشقوق من الرقاقة للدلالة على توجيه الرقاقة، ويهتدى المصنعون بتلك العلامات ـ سواء المستوية فيها أو المحزوزة ـ عند نشر الرقاقة لقطع صغيرة تحوى كل منها نبيطة مفردة، يقل الفاقد فى النبائط إذا ما تم القطع باتجاهات معينة بالنسبة للبلورة (قطع البلّورة فى اتجاهات محددة ضرورى أيضا عند صقل بلورات الماس لتقليل الفاقد). وما نود أن نؤكد عليه

هنا هو الأهميــة العملية لمعــرفة الاتجاهات والمستــويات البلّورية، وكذلك نستــخدم أدلة ميللر الموضحة بالصورة (١-٥) لتحديد المستويات والاتجاهات داخل البلورة.



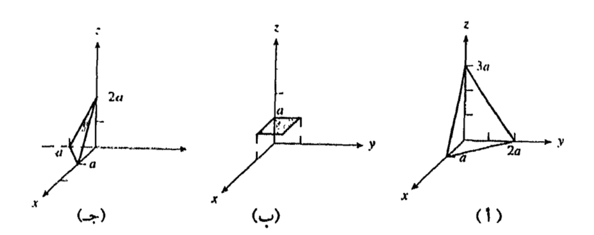
شكل (١-٥) رقاقات سيليكون البلورة الواحدة، والمستخدمة نمطيا كقواعد ابتدائية بواسطة مصنعي النبائط الرئيسين. الرقاقات 150mm، 200mm سمكهما 0.625mm و 0.7588 على الترتيب، الوجه الأمامي يلمع ويبرد ويحفر لإعطاء سطح خال من العيوب ويشبه المرآة. يظهر الشكل مستويات واتجاهات محددة بأدلة ميللر

تُحدد أدلة ميللر لأى مســتوى يحوى على ذرات من البلورة بإجراء أربع خطوات نوضحها بالتفصيل كما يلي، مع استخدام القيم الممثلة فى الشكل (١-٦ أ) كمثال.

١- بعد توجـيه محــاور الإحداثيات باتجاه أحــرف خلية الوحدة، نحــدد الأجزاء المقطوعة من المحــاور مع المستوى. ثم نقسم أطوال هذه الأجـزاء على طول ضلع خلية الوحدة على الصورة :

$$\frac{1\,a}{a} \,،\, \frac{2\,a}{a} \,،\, \frac{3\,a}{a}$$

بذلك نحصل على ثلاثة أرقام x, y, z بالقيم 1, 2, 3 .



شكل (١-٦) عينات من مستويات البلورة المكعبة
(أ) المستوى (632) أستخدم لتوضيح طريقة أدلة ميللر.
(ب) المستوى (001).
(جـ) المستوى (1̄ 2 2).

٢- نكتب مقلوبات أرقام الأجزاء المقطوعة لتصبح $\frac{1}{3}$ ، $\frac{1}{2}$ ، 1 .

٣- نضرب المقلوبات السابقة فى عدد صحيح موجب مناسب بحيث تكون المقلوبات متناسبة مع أصغر أعداد صحيحة ممكنة فنحصل على 2 ، 3 ، 6 .

٤- تكتب هذه الأعداد داخل أقواس دائرية فتصبح (632).

يجب أن تؤخذ فى الاعتبار النقاط التالية :

أ- عندما يتوازى المستوى مع أحد المحاور يكون القطع عند ∞ ومقلوبه صفر. كمثال الأجزاء المقطوعة فى الشكل (١-٦ ب) هى $z = 1$، $y = \infty$ ، $x = \infty$، وبالتالى تكون ادلة ميللر هى (001).

ب- إذا كان للمستوى المطلوب تحديد أدلته جزء مقطوع على الناحية السالبة من محور ما فإننا نضع شرطة فوق الدليل المناظر مثلا المستوى بالشكل (١-٦ جـ) نعين له الأدلة ($22\bar{1}$).

جـ بالرجوع للشكل (١-٤ أ) سنجد أن الستة مستويات التى تنطبق على أوجه المكعب تحوى نفس الترتيب من الذرات. وبسبب تماثل البلورة سنجد أنه من المستحيل التمييز بين المستويات المتكافئة (100)، (010)، (001)، ($\bar{1}00$)، ($0\bar{1}0$)، ($00\bar{1}$).

نعيد صياغة هذه الحقيقة بالعبارة التالية: مستحيل التمييز بين مجموعة المستويات {100} المتكافئة ويعبر عنها برمز ميللر ذى الأقواس المتموجة { }.

٤- لتحديد أدلة ميللر لمستوى يمر بنقطة الأصل نعين أدلة ميللر لمستوى آخر يوازى المستوى الأصلى، ومن تناظر المستويات المتوازية تكون أدلة المستوى الأصلى هى نفسها أدلة المستوى الموازى.

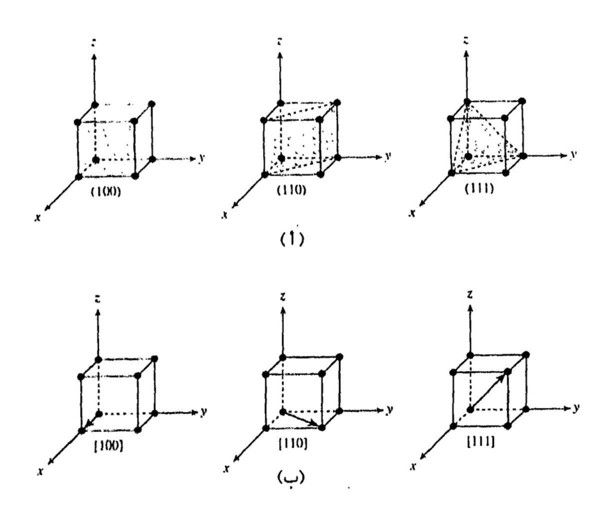
الثلاثة مستويات الأكثر شيوعا هى (100)، (110)، (111). هذه المستويات موضحة بالشكل (١-٧) والذى يأخذ الشبيكة المكعبة البسيطة كمرجع. (ملحوظة، الشبيكة المكعبة البسيطة تذكر كنموذج فقط لكنها وعلى العكس من الشبيكات المكعبة الأخرى فإنها غير موجودة بالطبيعة).

أدلة ميللر للاتجاه، تشبه إحداثيات المتجهات vectors التى يدرسها الطالب فى منهج جبر المتجهات. لتحديد أدلة ميللر لاتجاه ما نأخذ متجها فى نفس الاتجاه ثم نقوم بضربه فى معامل حتى تصبح إحداثياته الثلاثة أقل ثلاثة أعداد صحيحة ممكنة. ثم نضع هذه الأعداد الصحيحة داخل قوس مربع [ ]. والأقواس المثلثة < x y z > ترمز لكل الاتجاهات المكافئة. والمتجهات الثلاثة الأكثر شيوعا وأدلة ميللر المكافئة لها موضحة بالشكل (١-٧ ب).

نلخص رموز أدلة ميللر المختلفة كالآتى :

الرمز	الكيان المناظر
(h k l)	مستوى بلورى
{h k l}	مستويات متكافئة
[h k l]	اتجاه بلورى
<h k l>	اتجاهات متكافئة

الذى ناقشناه حتى الآن هو إيجاد أدلة ميلر لمستوى أو اتجاه بلورى، ماذا عن العكس: إذا كان لدينا أدلة ميلر فكيف نحدد المستوى أو الاتجاه البلورى المناظر؟ من حسن الحظ أنه نادرا ما نقابل أدلة خلافا للثلاثة (001)، (110)، (111) (أو الأدلة على الاتجاه [001]، [110]، [111])، وهى موضحة بالشكل (١-٧) ويمكن حفظها بسهولة مع التكرار.



شكل (١-٧) تصوير (أ) مستويات و (ب) اتجاهات شائعة مع أدلة ميلر لها

من المفيد أن نلاحظ أن فى البلّورات المكعبة تكون المستويات (hkl) عمودية على الاتجاهات [hkl]، وبالنسبة لأية أدلة أخرى ـ خلافا للثلاثة الشائعة المذكورة أعلاه علينا أن نعكس الخطوات السابق ذكرها للحصول على المستويات أو الاتجاهات.

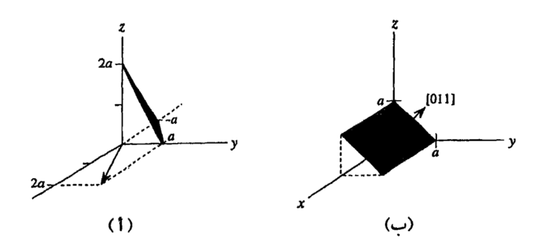
مثال ١-٢ :

(أ) حدد أدلة ميللر للمستوى والاتجاه الموضحين بالشكل (١-٨).

(ب) ارسم المستوى الذى أدلته (011) وكذلك الاتجاه [011].

الحل :

(أ) الأجزاء المقطوعة هى $x = 1, y=1, z=2$. المقلوبات على التوالى هى: $\frac{1}{2}$، 1، 1. بالضرب فى 2 للحصول على أقل مجموعة أعداد صحيحة نحصل على أدلة ميللر (1 2 2) للمستوى



شكل (١-٨) - مثال ١-٢

بالنسبة للاتجاه فى الشكل (١-٨ أ) نجد أن مساقطه على المحاور x ،y،z هى: 0، a ، 2 a على الترتيب بالقسمة على a نحصل على أدلة ميللر [2 1 0] لهذا الاتجاه.

(ب) للمستوى (011) مقلوبات الأجزاء المقطوعة هى 0، 1، 1 على الترتيب، وبالتالى $x=\infty, y=1, z=1$ أى أن المستوى يوازى المحور x ويقطع المحور y عند $y=1$، والمحور z عند $z=1$ كما هو موضح بالشكل (١-٨ ب).

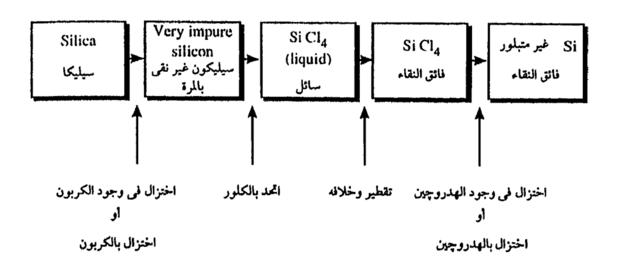
فى الشبيكة المكعبة يكون الاتجاه [011] عموديا على المستوى (011) وبالتالى نرسم هذا الاتجاه كما بالشكل (١-٨ ب).

(١-٣) نمو البلورة Crystal Growth

١-٣-١ الحصول على السيليكون الفائق النقاء Obtaining Ultra Pure Si

عندما ننظر لأشباه الموصلات المتاحة وخصوصا السيليكون الواسع الانتشار، فإننا نتسائل عن مصدر بلورة السيليكون المفردة المستخدمة فى نبائط الزمن المعاصر. هل مصدر هذا السيليكون هو ترسيبات الأحجار الرملية؟ الإجابة لا. هل يستخرج مثل الماس والذهب من مناجم معينة؟ الإجابة مرة أخرى بالنفى. فعنصر السيليكون يمثل ثانى أكثر العناصر شيوعا بالقشرة الأرضية ويدخل فى تركيب العديد من المركبات مثل السيليكا (أكسيد السيليكون SiO_2) والسيليكات (مركبات تحوى السيليكون والأكسجين

زائد عناصر إضافية). بالرغم من ذلك كله فإن السيليكون لا يتواجد فى الطبيعة كعنصر مستقل. بلورة السيليكون المفردة المستخدمة فى صنع النبائط هى فى الحقيقة مادة يصنعها الإنسان.



شكل (١-٩) موجز العمليات المستخدمة لإنتاج السيليكون الفائق النقاء
العمليات هى بالترتيب: الاختزال بالكربون - الفلورة والتقطير - الاختزال بالهدروچين

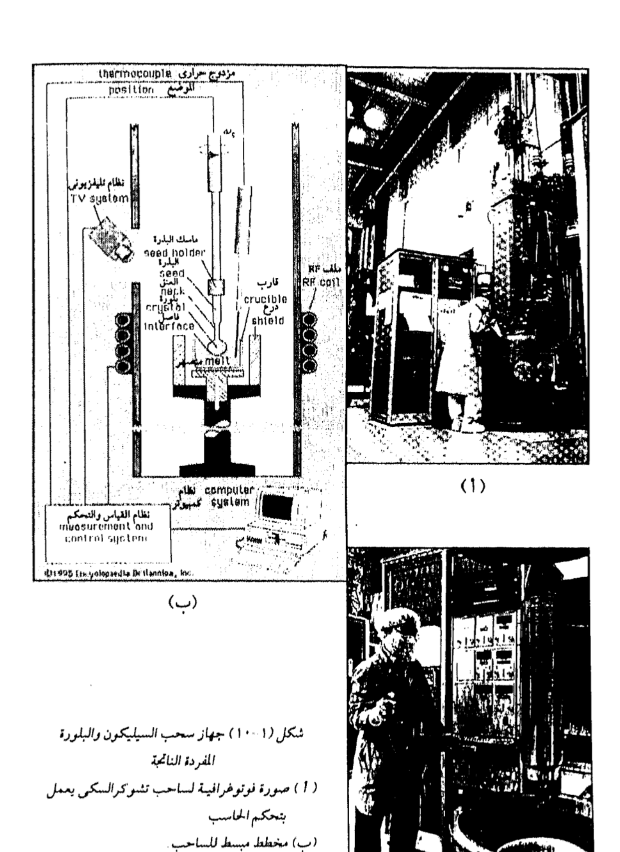
يتضح من المدخل السابق أن الخطوة الأولى نحو الحصول على سيليكون البلورة الواحدة هى فصل السيليكون من مركباته ثم تنقيته. يوضح الشكل (١-٩) عمليات الفصل والتنقية البارعة. أولا، يتم إنتاج السيليكون ذى النقاء المنخفض أى الفيروسيليكون عن طريق تسخين السيليكا مع الكربون فى فرن كهربى. يقوم الكربون أساسا بانتزاع الأكسچين من السيليكا (أى يختزله بلغة الكيمياء) تاركا خلفه السيليكون غير النقى. بعدها تتم كلورة chlorination الفيروسيليكون لتحويله لمادة سائلة عند درجة حرارة الغرفة (Si Cl_4 أو Si HCl_3) . قد يبدو هذا غريبا لكن خطوة التسييل هذه هى مناورة بارعة. فبينما يكون من الصعب جدا تنقية المواد الصلبة فإن هناك طرقا نمطية لتنقية السوائل. بعد عديد من عمليات التقطير وعمليات أخرى نحصل على Si Cl_4 (أو $SiHCl_3$) فائق النقاء. أخيرا باختزال الهاليد العالى النقاء فى جو من الهدروچين نحصل على السيليكون فائق النقاء المطلوب [$Si\,Cl_4 + 2H_2 \rightarrow 4HCl + Si$] .

١-٣-٢ تكوين البلّورة المفردة Single-Crystal Formation

السيليكون الناتج من العملية التى وصفناها فائق النقاء لكنه ليس فى صورة بلّورة مفردة بل فى صورة سيليكون متعدد البلورة، بالتالى تلزم عملية أخرى لتحويله لبلّورة مفردة كبيرة جاهزة لتصنيع النبائط. الطريقة الأكثر شيوعا للحصول على بلّورة مفردة كبيرة هى طريقة تشوكرالسكى. فى هذه الطريقة يسخن السيليكون فى قارب من الكوارتز فى جو من غاز خامل لتحضير مصهور السيليكون كما هو موضح بالشكل (١-١٠) تثبت بلّورة صغيرة من السيليكون بأسفل عمود يسمى عمود البذرة. يتم اختيار الاتجاه العمودى على السطح السفلى للبلّورة البذرة بعناية ليكون باتجاه معروف مسبقا (عادة ما يكون <111> أو <100>). تغطس البلّورة البذرة فى مصهور السيليكون، وبعد تحقيق الاتزان الحرارى تنخفض درجة حرارة المصهور الملامس للبذرة ويبدأ فى التجمد بأسفل البذرة مكونا امتدادا بلوريا فى نفس اتجاه بلورة البذرة. ثم نبدأ فى تدوير عمود البذرة ببطء مع سحبه لأعلى لإنماء بلّورة أكبر فأكبر. يعرض الشكل (١-١٠ جـ) صورة فوتوغرافية للبلورة الكبيرة بعد تكونها. تعرف البلّورة الكبيرة الاسطوانية الشكل باسم الصبة ingot، وتأتى بقطر 200 mm، أو 300 mm. وطول من متر إلى مترين. تنتج رقاقات السيليكون (التى سمكها حوالى واحد ملليمتر) المستخدمة فى إنتاج النبائط عن طريق قطع الصبة إلى مقاطع باستخدام منشار له حد من الماس.

(١-٤) ملخص :

يوفر هذا الفصل المعلومات الأساسية عن أشباه الموصلات عموما والسيليكون على وجه الخصوص. ذرات أشباه الموصلات المكونة من عنصر واحد لها أربعة إلكترونات تكافؤ. السيليكون المستخدم لإنتاج النبائط يأتى فى صورة بلورة مفردة من سيليكون فائق النقاء. يتبلور هذا السيليكون على هيئة شبيكة ماسية بينما يتبلور زرنخيد الجاليوم Ga As فى صورة شبيكة زنكبلند، وفى كلتا الحالتين تحاط كل ذرة فى الشبيكة بأربعة أقرب جيران. أدلة ميللر التى نوقشت فى سياق التركيب البلّورى هى الوسيلة المتفق عليها لتحديد المستويات والاتجاهات داخل البلّورة. وأخيرا فإن بلّورات السيليكون المفردة الكبيرة تنتج بواسطة طريقة تشوكرالسكى.



شكل (١-١٠) جهاز سحب السيليكون والبلورة المفردة الناتجة

(أ) صورة فوتوغرافية لساحب تشوكرالسكي يعمل بتحكم الحاسب

(ب) مخطط مبسط للساحب.

(جـ) صبة *ingot* سيليكون بلورة واحدة.

أسئلة على الفصل الأول :

١ - أجب على الأسئلة التالية بإيجاز :

أ - اذكر اسم شبه موصل أحادى العنصر وآخر مركب III-V.

ب- ما الفرق بين مادة متبلورة وأخرى متعددة البلورة ؟

جـ- عرف بالكلمات الخلية الوحدة.

د- ما عـدد الذرات فى خلية وحدة واحـدة لكل من التراكيب التـالية : مكعب بسيط - bcc - fcc - شبيكة ماسية.

هـ- 1 Å يساوى كم cm ؟

و - بدلالة ثابت الشـبيكة a ما هى المسـافة بين أقرب ذرتين فى شـبيكة مكعب بسيط؟

ز -- كم عدد الذرات الأقرب جيرة فى الشبيكة الماسية والشبيكة الزنكبليند؟

ح - ما الفرق بين القوسين ( ) ، [ ] عند استخدامهما كأدلة ميللر؟

ط - صف طريقة تشوكرالسكى لإنتاج بلورة مفردة.

٢- يبين الشكل (١-٤ب) خلـية وحـدة Ga As. صف أو ارسم خليـة وحـدة لبلورة $Ga_{0.5} Al_{0.5} As$.

٣- ثابت الشبيكة لـلجرمانيوم عند درجة حـرارة الغرفة هو $a = 5.65\times10^{-8}cm$. احسب عدد ذرات الجرمانيوم لكل cm^3.

٤- بدلالة ثابت الشبكية a ما هى أقل مسافة بين الذرتين الأكثر قربا فى حالة:

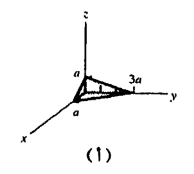
(أ) الشبيكة bcc   (ب) الشبيكة fcc.

٥- سطح رقاقة سيليكون هو المستوى. (100)

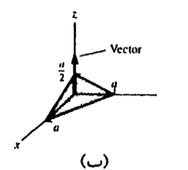
(أ) ارسم مخططا لمواضع الذرات على سطح الرقاقة.

(ب) حدد عدد الذرات لكل cm^2 على سطح الرقاقة.

(جـ) أعد الجزئين (أ) و (ب) إذا كان سطح الرقاقة هو المستوى (110).



(أ)



(ب)

شكل (م ١-٦)

٦- اكتب الخطوات الوسيطة عند إجابة الأسئلة التالية :

أ - كما هو مبين فى الشكل (م ١-٦ أ) فإن مستوى البلورة يقطع المحاور x، y، z عند 1a، 3a، 1a بالترتيب، حيث a هو طول ضلع الخلية المكعبة. ما هى أدلة ميللر لهذا المستوى؟ ما هى أدلة ميللر للاتجاه العمودى على هذا المستوى.

ب- بافتراض أن التركيب البلورى مكعب احسب أدلة ميللر للمستوى وكذلك للمتجه المبين بالشكل (م١-٦ ب).

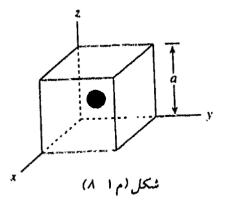
٧- بافتراض أن البلّورة مكعب بسيط ارسم مخطط للمستويات الآتية :

(أ) (001)   (ب) (1 1 1)   (ج) (1 2 3)

(د) (1 1 0)   (هـ) (0 1 0)   (و) $(1\,\bar{1}\,1)$

(ز) (2 2 1)   (ح) $(0\,\bar{1}\,0)$

٨- شبيكة بلّورية لها خلية وحدة مكعبة كما بالشكل (م ١-٨). تحوى الخلية ذرة واحدة فقط عند مركز المكعب.



شكل (م ١-٨)

(أ) ما اسم الشبيكة المولدة من خلية الوحدة المعطاة ؟

(ب) حدد عدد ذرات الشبيكة لكل cm^3 بدلالة الثابت a .

(جـ) نفترض أن مستوى سطح البلورة هو (110) عين عدد الذرات لكل وحدة مساحات والتي تقع مراكزها فى المستوى (110).

(د) برسم متجه من نقطة الأصل لمركز الذرة الموجودة فى خلية الوحدة. عيِّن أدلة ميللر لهذا المتجه.

٩- إذا عاملنا الذرات ككرات صلدة نصف قطرها يساوى نصف المسافة بين أقرب ذرتين. بين أن نسبة الحجم الذى تحتله الذرات إلى الحجم الكلى المتاح للتركيبات البلّورية المختلفة هى:

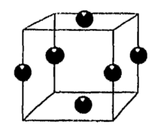
(أ) $\pi/6$ أى 52% لشبيكة المكعب البسيط.

(ب) $\sqrt{3}\ \pi/8$ أى 68% لشبيكة bcc.

(جـ) $\sqrt{2}\ \pi/6$ أى 74% لشبيكة fcc.

(د) $\sqrt{3}\ \pi/6$ أى 91% للشبيكة الماسية.

١٠- شبيكة مكعبة بها ذرة عند منتصف كل ضلع رأس الشكل (م ١-١٠) وذرة عند مركز القاعدة العليا وأخرى عند مركز القاعدة السفلى.



شكل (م ١-١٠)

(أ) كم ذرة لكل خلية : 4 ، 2 ، 1 ، أم $\frac{1}{2}$ ؟

(ب) هل يمكن تصنيف هذه الشبيكة ضمن الشبيكات (sc - bcc - fcc - ماسية).





الفصل الثاني

نمذجة حاملات الشحنة

CHARGE CARRIERS MODELING



(٢-١) مفهوم الكمومية

(٢-٢) نماذج شبه الموصل

(٢-٣) خواص حاملات الشحنة الكهربية

(٢-٤) توزيعات الحالات والحاملات

(٢-٥) تركيزات حاملات الشحنة عند الاتزان

(٢-٦) ملخص وملاحظات ختامية

أسئلة الفصل



أصبح معروفا أن حاملات الشحنة تنتقل من مكان لآخر داخل المادة لتسبب تيارات كهربية. وفى الموصلات التى تقوم بنقل التيار عبر الأسلاك يوجد نوع واحد من الجسيمات وهو الإلكترون. بجانب الإلكترون يوجد فى شبه الموصلات حاملة شحنة أخرى هى الشغرة. تمثل الإلكترونات والشغرات بما تحمله من شحنات كهربية مركز اهتمام هذا الفصل، حيث نقوم بفحص المفاهيم المرتبطة لهذه الحاملات وكذلك نماذجها، وخصائصها، وأيضا المصطلحات الخاصة بها.

ستجرى تذكرة القارئ مرارا، وها نحن نؤكد على ذلك من البداية على أننا دائما سنفترض أن الظروف السائدة فى شبه الموصل -فى هذا الفصل- هى ظروف الاتزان.

و«الاتزان» هنا يعنى عدم وجود أية قلاقل perturbation. فتحت ظروف الاتزان لن توجد جهود كهربية خارجية، ولا مجالات مغناطيسية، ولا إجهادات ميكانيكية، ولا أية قوى مقلقة من أى نوع تؤثر على شبه الموصل. وكل الكميات الممكن قياسها ستظل ثابتة مع الزمن، وسيوفر ذلك إطارا مرجعيا ممتازا. عندما نقوم بتحديد الخصائص المميزة لشبه الموصل فى ظروف الاتزان، فإننا سنستطيع لاحقا أن نستقرئ ونمد extrapolate هذه الخصائص لتشمل أيضا حالات عدم الاتزان عند وجود قلقلة خارجية.

ونشير مسبقا بأن بعض العلاقات الرياضية والحقائق ستعطى بدون برهان كاف. لإعطاء الأهمية لتفسير النتائج واستخدامها وليس لاشتقاقها. ويمكن لمن يود، الرجوع للمراجع الأكثر تفصيلا.

(٢-١) مفهوم الكمومية The Quantization Concept

بدلا من محاولة التعامل مباشرة مع الإلكترونات فى السيليكون، حيث يوجد 14 إلكترونا لكل ذرة وحوالى 5×10^{22} ذرة لكل سنتيمتر مكعب، سنسلك طريقا واقعيا ونحاول إرساء قواعد أساسية معينة باختبار النظم الذرية البسيطة، وأبسطها على الإطلاق ذرة الهدروچين المنعزلة، التى خضعت لتمحيص شديد بمطلع القرن العشرين. فى ذلك الوقت عرف العلماء أن ذرة الهدروچين تحوى إلكترونا واحدا سالب الشحنة يدور فى فلك جسم موجب أثقل منه. والذى لم يكونوا على دراية به هو السبب فى أن الذرة

المستثارة تـطلق ضوءا له أطوال موجية محـددة وأن طيف الضوء المنبعث من الذرة ليس طيفا متـصلا بل هو عبارة عن خطوط كل خط له طول موجة محـدد. وقد حيرت هذه الظاهرة الكثيرين لاعتقادهم بضرورة أن يكون الـطيف متصلا كالطيف المنبعث من جسم ساخن.

اقترح «بوهر» فى عام 1913 حلا لهذه المعضلة فافترض أن العزم الزاوى (حاصل ضرب كـمية الحركـة فى نصف قطر المدار) لا بد وأن يأخذ قـيما مـحددة (مضاعـفات صحيحة للثابت $\hbar$) وسيأخذ نصف قطر المدار بالتالى قيـما منفصلة محددة. عرف هذا الفرض بكمومية العزم الزاوى، وهذا أدى إلى كمومية الطاقة، أى أن :

$$E_n = -\frac{m_o q^4}{2(4\pi\varepsilon_o \hbar n)^2} = -\frac{13.6\ \text{eV}}{n^2} \qquad (2\text{-}1)$$

$$n = 1, 2, 3, \ldots$$

تمثل E_n طاقة ربط الإلكتـرون لذرة الهدروچين، فإذا كـان الإلكترون فى المدار n وأعطيت له الطاقة E_n سيترك نواة الذرة ويتحرر. والثوابت :

m_o هى كتلة الإلكترون الحر . $(m_o = 9.1 \times 10^{-31}\ \text{kg})$.

q شحنة الإلكترون . $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C (كولومب =C).

ε_o سماحية الفراغ $\varepsilon_o = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m.

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ، ويساوى $\hbar = 1.05 \times 10^{-34}$ J.S.

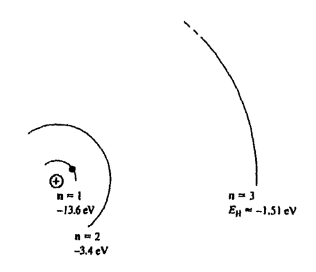
حيث h ثابت بلانك.

n يسمى بالعدد الكمى الرئيسى.

eV هو الإلكترون ڤولت ويساوى $1\ \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ J.

كنتيجـة لنظرية بوهر عند انتقال الإلكترون من مـدار له عدد كمى n معين لمدار اخر له عدد كمى n' أصغر يصاحبه انبعاث للطاقة عـلى هيئة كمية الضوء بطول موجة محدد، شكل (٢ ١). وكان هذا هو التفسير الذى قدمه بوهر للأطياف المتقطعة.

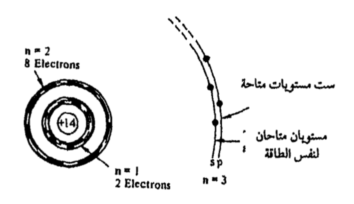
الذى يهمنا من نموذج بوهر هو أن طاقة الإلكترون فى النـظم الذرية تأخذ قيـما متقطعة discrete. وكما نتوقع فإن مخطط مـستويات الطاقة لذرة السـيليكون سيكون



شكل (٢-١) ذرة الهدروچين تمثيل مثالى يظهر الثلاثة مدارات الأولى المسموح لها والطاقة المكممة المناظرة

أكثر تعقيدا من نظيره بذرة الهـدروچين، طبقا لقوانين ميكانيكا الكم فإن إلكترونات ذرة السيليكون تشـغل ثلاثة مدارات رئيسيـة،انظر الشكل (٢-٢)، عشرة إلكتـرونات تشغل المدارين العميقين الداخليين $(n = 2, n = 1)$ وترتبط بالنواة ارتباطا وثيـقا. هذا الارتباط الوثيق يمنع الإلكتـرونات العشـرة من الاشتـراك فى التفـاعلات الكيـميائيـة للذرة ومن الاشتراك فى حمل التيار الكهربى. هذه الإلكتـرونات العشرة عادة ما تسمى بإلكترونات اللب core في الذرة.

الإلكترونات الأربعـة المتبقية ترتـبط بالذرة ارتباطا ضعيـفا، ويطلق عليها تسـمية إلكترونات التكافؤ valance electrons لمشاركتـها بنشاط فى التفـاعلات بين الذرات.



شكل (٢-٢) تمثيل تخطيطى لذرة سيليكون معزولة

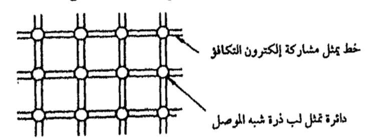
وكما هو مبين بالشكل (٢-٢) فإن إلكترونات التكافؤ الأربعة إذا ما تركت بدون حدوث قلاقل من الخارج ستشغل أربعا من عشرة فتحات (أو حالات) طاقة تقع مباشرة فوق مستويات طاقة إلكترونات اللب. ونلاحظ هنا أن ذرة الجرمانيوم (وهو العنصر شبه الموصل الآخر) والتى بها 32 إلكترونا تشبه جدا ذرة السيليكون عدا أن لب الجرمانيوم يحوى 28 إلكترونا.

(٢-٢) نماذج شبه الموصل Semiconductor Models

بناء على المعلومات التى تعرفنا عليها حتى الآن سنقدم هنا نموذجين هامين أو أداتين من الأدوات المساعدة للتصور visualization المستخدمة على نطاق شامل فى تحليل نبائط أشباه الموصلات. قد يبدو غريبا أن نقحم نماذج شبه الموصل فى فصل يتناول بالأساس نمذجة الحاملات. لكن سيزول الاستغراب إذا ما عرفنا أننا هنا ننمذج model الوعاء الحاوى للحاملات ونقصد به بلّورة شبه الموصل ذاتها.

٢-٢-١ نموذج الروابط Bonding Model

عرفنا أن ذرة السيليكون المنعزلة أى التى لا تتفاعل مع الذرات الأخرى تحوى أربعة إلكترونات تكافؤ. من ناحية أخرى فإن ذرات السيليكون التى تضمها الشبيكة الماسية تبدى ترابطا على هيئة تجاذب بين كل ذرة وأربعة من جيرانها الأكثر قربا (ارجع للشكل (١-٤ جـ). المغزى هنا أنه بالتحول من حالة ذرة معزولة إلى حالة التجميع البلّورى تلجأ كل ذرة بإشراك أحد إلكترونات التكافؤ مع كل واحدة من الجيران الأربعة الأكثر قربا. هذه الرابطة التساهمية covalent -أى المشاركة المتساوية لإلكترونات التكافؤ بين الجيران الأكثر قربا- تعطى نموذجا مثاليا لشبه الموصل كالمبين بالشكل (٢-٣).

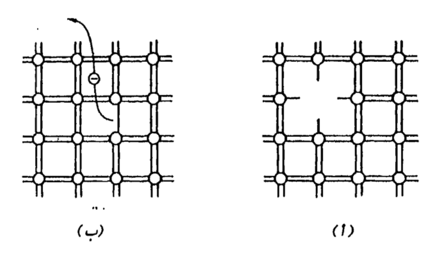


شكل (٢-٣) نموذج الروابط - الخط يمثل إلكترون تكافؤ مشترك والدائرة تمثل قلب ذرة شبه الموصل

فى هذا الشكل تمثل كل دائرة لب ذرة شبه موصل بينما يمثل كل خط أحد الإلكترونات التكافؤ المساهمة (يوجد ثمانية خطوط تربط الذرة بجيرانها؛ لأن كل ذرة تمنح أربعة إلكترونات، وكذلك تقبل مساهمة الجيران بأربعة إلكترونات أخرى).

طبعا المخطط الثنائى الأبعاد هو مجرد تبسيط للمساعدة على التخيل؛ لأن الذرة وجيرانها الأربعة لا تقع فى الواقع فى مستوى واحد، لكن الذرة تشغل مركز هرم رباعى الأوجه وجيرانها بأركان الهرم الأربعة -كل أوجه الهرم الرباعى الأوجه -عبارة عن مثلثات متساوية الأضلاع.

وبرغم أن نموذج الروابط سيستعمل كثيرا فى الفقرات اللاحقة، فإنه من المفيد هنا إعطاء عينة من تلك الاستخدامات لتوضيح كيفية الاستفادة من هذا النموذج. يرى فى الشكل (٢-٤) تطبيقين كعينة. في الشكل (٢-٤ أ) نستخدم نموذج الروابط لتصوير عيب نقطى **point defect** أى ذرة غائبة من التركيب الشبكى.



شكل (٢-٤) عينة من استخدامات نموذج الروابط

(أ) تصوير ذرة مفقودة أو عيب نقطة.

ب) انكسار رابطة ذرة-ذرة وتحرر إلكترون.

يصور الشكل (٢-٤ب) تكسر رابطة بين ذرتين متجاورتين وما يستتبعه ذلك من انطلاق إلكترون حر. عند درجات حرارة تعلو الصفر المطلق تتكسر الروابط وتتكون عيوب الشبيكة بشكل طبيعى وتأخذ فى التزايد مع زيادة درجة الحرارة، ولهذا فإن النموذج المثالى كالموضح بالشكل (٢-٣) يمثل شبه الموصل عند درجة حرارة الصفر المطلق فقط وأيضا عندما يكون شبه الموصل خاليا من أى شوائب أو عيوب.

٢-٢-٢ نموذج نطاق (شريط) الطاقة Energy Band Model

إذا اقتصر اهتمامنا فقط على النواحى الفراغية للأحداث الواقعة داخل شبه الموصل فربما يمكن عندئذ الاكتفاء بنموذج الروابط. غير أننا نهتم أيضا بالنواحى المتعلقة

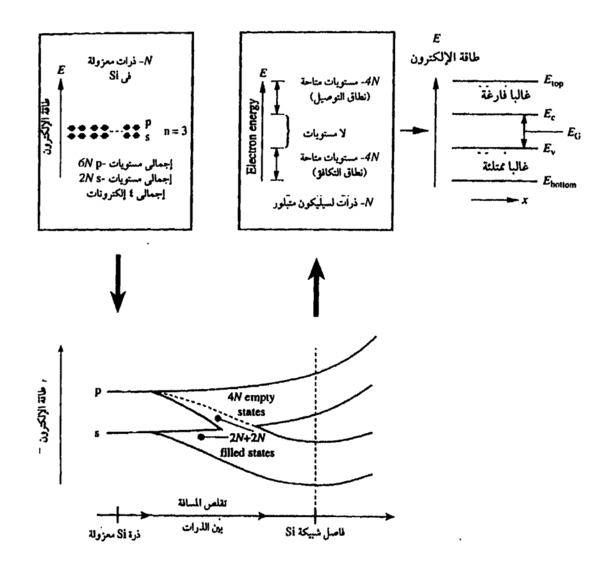
بالطاقة فى منظومة شبه الموصل. فى هذه الحالة سيغدو نموذج الروابط -الذى لا يخبرنا بأى شىء عن الطاقة- عديم الجدوى وسيصبح نموذج نطاق (شريط) الطاقة هو أداة التصور الأساسية.

دعونا نبدأ مسلسل المفاهيم المؤدى لنموذج نطاق الطاقة باستدعاء الوضع داخل ذرة سيليكون معزولة، بالرجوع للمناقشة فى الفقرة ٢-١ نذكر أن عشرة من الإلكترونات الأربعة عشر فى ذرة السيليكون المعزولة تكون مرتبطة ارتباطا وثيقا بالنواة، ومن المستبعد أن تتقلقل من مكانها فى لب الذرة بسبب تفاعلات الذرة مع جيرانها. الإلكترونات الأربعة المتبقية هى التى ترتبط ارتباطا ضعيفا، إذا لم تتعرض لقلاقل فإنها ستشغل مستويات الطاقة التى تعلو آخر مستوى طاقة لإلكترونات اللب. ويفهم ضمنا أن عدد N من ذرات السيليكون ستكون كلها متماثلة ومستويات الطاقة لها متطابقة طالما أن كل هذه الذرات متباعدة بما فيه الكفاية ولا يتفاعل بعضها مع بعض.

هل يمكن الاستفادة من معلوماتنا عن الذرات المعزولة لاستقراء بعض المفاهيم عن الذرات فى الحالة البلّورية؟ أولا: دعونا نتجاهل من الآن فصاعدا إلكترونات اللب لأنها لا تتأثر بالقوى العادية بين الذرات. وبالعكس فإن حالات إلكترونات التكافؤ التى تخص N من الذرات ستتعدل جذريا بالانتقال إلى الحالة البلّورية. أى أن تقارب الذرات كما فى حالة السيليكون البلّورى سيؤدى لا محالة لتعديلات فى حالة الطاقة لإلكترونات التكافؤ.

يبين الشكل (٢-٥) التغيرات التى تحدث لمستويات الطاقة لإلكترونات التكافؤ. إذا بدأنا بـ N من الذرات المعزولة وأخذنا نقربها بعضا لبعض رويدا رويدا سنجد أن القوى الذرية ستعمل على توسيع مستويات الطاقة إلى نطاقات طاقة. أى أن حزمة N من مستويات الطاقة المتطابقة -التى كانت تمثل بخط وحيد- على محور الطاقة للذرات N المعزولة ستبدأ فى الانفصال على هيئة حزمة مستويات متراصة ومتلاصقة وتسمى هذه الحزمة بنطاق الطاقة. يحدث هذا لكل مستوى طاقة للذرة المعزولة. المستوى يتسع ليصبح نطاقا. عندما يصبح الفاصل بين الذرات هو ثابت الشبيكة (أى حوالى عدة أنجشترومات) تتوزع الحالات الثمانية المسموح بها لإلكترونات التكافؤ الخاصة بـ N من الذرات إلى نطاقى طاقة يفصل بينهما فجوة طاقة energy gap أو فجوة نطاق band gap. النطاق الأعلى يسمى بنطاق التوصيل conduction band، والأسفل هو نطاق التكافؤ valence band، وإشغال النطاقين يحكمه عدة مبادئ:

أولا: مبدأ استبعاد «باولى» الذى ينص على أنه: «لا يمكن لإلكترونين أن يشغلا



شكل (٢-٥) مفهوم تطور نموذج نطاق الطاقة بدءا من N ذرة سيليكون متباعدة بأعلى اليسار وانتهاء إلى نموذج نطاق طاقة مكتمل الصورة بأعلى اليمين

نفس الحالة الكمية (المكماة)». أى أن الحالة الواحدة إما أن تكون غير مشغولة أو مشغولة بإلكترون واحد.

ثانيا : تُشغل الحالات ذات الطاقات الأقل أولا، أى أن الإشغال يتم من أسفل إلى أعلى. عدد إلكترونات التكافؤ فى البلّورة هو $4N$ ويحوى نطاق

التكافؤ على $4N$ من الحالات، وبالمثل نطـاق التوصيل يحـوى أيضا $4N$ من الحالات.

من هذا كله نسـتنتج أن الإلكترونات التى عـددها 4N ستـشغل نطاق التـكافؤ بالكامل بينما يظـل نطاق التوصيل خاليـا. وبالفعل هذا هو التوزيع الحـادث عند درجة حرارة الصفر المطلق T= 0 K.

ولكى نكمل وجاهة النموذج سنحتاج لاستعراض حقـيقة إضافية. فبعكس حالة الذرة المعزولة فـإن إلكترونات النطاق ليست مرتـبطة بذرة بعينها. صحـيح أنه بالمتوسط سنجد أربعة إلكتـرونات مشتركة بين الذرة وجيرانهـا كما فى نموذج الروابط. لكن هوية الإلكترونـات المشتركـة تتغـير مع الزمن؛ لأن الإلكتـرونات تتحرك من نـقطة لأخرى. وبصيغة أخرى فإن حالات الإلكترونات لم تعد حالات ذرية بل حالات مرتبطة بالبلّورة ككل، ويصبح تشكيل الحالات المسموح بها مسـتقلا عن موضع النقطة التى ندرسها فى داخل البلّورة التامة. ومن ثم نستنتج أن فى حالة البلّورة التامة (الخالية من أى عيوب أو شوائب) تكون منحـنيات مسـتوى الطاقة -كـدالة فى المسافة المقـاسة فى اتجاه مـحدد- مسـتقلة عن المسافـة (أى تظهر المنحنيات كـخطوط أفقيـة) كما هو مـبين بالجزء العلوى الأيمن من الشكل (٢-٥). هذا المخطط المذكور الـذى يبين حالات الطاقة المسمـوح بها هو نموذج لمخطط نطاق طاقة أولى، والخط E_C يمثل أقل مسـتوى طاقة مسـموح به فى نطاق التوصـيل (قاع نطاق التـوصيل CB)، بينما الخط E_V يمثل أعلى مـستـوى طاقة مسموح به فى نطاق التكـافؤ (أى سقف نطاق التكافؤ VB). الفرق $E_G = E_C - E_V$ هو طاقة فجوة النطاق.

أخيرا يوضح الشكل (٢-٦) نموذج نطاق طاقة أولى والذى سنـشاهده كثيرا. هذا المخطط المختـصر للغاية يبين قاع نطاق التـوصيل E_C وسقف نطاق التكافؤ E_V. يفهم ضمنيـا أن المحور الرأسى يمثل طاقـة الإلكترون بوحـدة مناسبـة مثل eV، بينما المحور الأفقى يمثـل المسـافـة المقاسة بوحدة مناسبـة مثل الميكرون μm. وهذه المحاور لا ترسم صراحة.

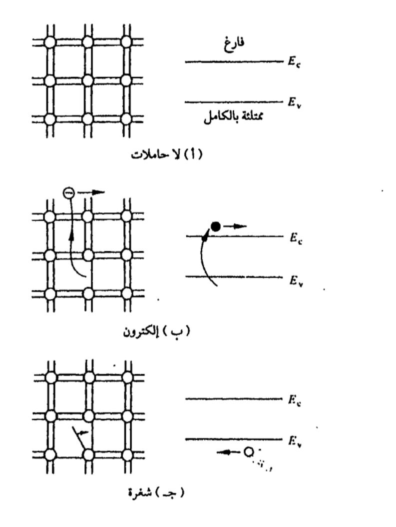
E_C ________________

E_V ________________

شكل (٢-٦) الصورة المبسطة وشائعة الاستعمال لمخطط نطاق الطاقة

٢-٢-٣ حاملات الشحنة Charge Carriers

يمكننا الآن بعد أن أرسينا جيدا كيفية نمذجة أشباه الموصلات أن نُدخل فى الصورة الكائنات الحاملة للتيار داخل شبه الموصل. بالنظر للشكل (٢-٧ أ) نلاحظ عدم وجود حاملات شحنة وبالتالى لا إمكانية لسريان التيار؛ لأنه أساسا لا توجد روابط مكسورة. هذا من وجهة نظر نموذج الروابط. أما من وجهة نظر نموذج نطاقات الطاقة سنجد أن نطاق التكافؤ مشغول بالكامل ونطاق التوصيل خال تماما من الإلكترونات، وبالتالى لا تتوافر حاملات لسريان التيار. وعدم توافر الحاملات يتضح جليا فى نموذج الروابط، لأنها -أى الحاملات- كلها مربوطة بذراتها، لكن نموذج نطاقات الطاقة يعطى صورة أدق؛ فعلى الرغم من الإشغال الكامل لنطاق التكافؤ بواسطة إلكترونات التكافؤ إلا أن



شكل (٢-٧) تصوير الحاملات فى نموذج الروابط (باليسار)، وفى نموذج نطاق الطاقة (باليمين)، (أ) فى حالة انعدام وجود أية حاملات، (ب) تمثيل إلكترون، (جـ) تمثيل شغرة

هذه الإلكترونات ليست ساكنة بل تتحرك بحـرية عبر البلّورة كلها. لكن هذه الحركة لا تسبب تـيارا كهـربيا؛ ذلك لأن لكل حـالة كمـية quantum state من حالات النطاق الممتلئ بالكامل ستوجد حـالة مناظرة، لها كمية حركة مساوية للأولى ومـعاكسة لها فى الاتجاه. وبالتالى للحـالتين معا يكون مجمـوع التيار صفرا. إذن بالنسـبه للنطاق الممتلئ تماما بالحاملات تكون محصلة كمية حركة الحاملات مساوية للصفر. ومن ثم لا يمكن أن يعطى أى تيار.

الإلكترونات التى يمكن أن تؤدى إلى تيار مبينة بالشكل (٢-٧ ب). عندما تتكسر رابطة سيليكون-سيليكون ينطلق منها إلكترون حر يمكنه التجول خلال الشبيكة، وعندئذ يشكل هذا الإلكترون «حـاملة شحنة». يمكن وصف هذا من خـلال نموذج نطاق الطاقة بالقـول أن استـثارة excitation الإلكتـرونات من نطاق التكافـؤ لنطاق التوصـيل تولد حاملات، فالإلكتـرونات الموجودة فى نطاق التوصيل تعتبـر حاملات. لاحظ أن الطاقة المطلوبة لكسر رابطة فى نموذج الروابط وطاقة فجوة النطاق E_G هما نفس الشىء، بالمثل الإلكترونـات المتحررة من روابط مـكسورة فى نموذج الروابط هى نفـسها الإلـكترونات الموجودة فى نطاق التوصيل فى نموذج نطاق الطاقة. ومن الآن فصاعدا عندما نذكر كلمة «إلكترونات» بدون تخصيص فسنعنى بها الإلكترونات الموجودة بنطاق التوصيل.

لا يولد تكسـر رابطة سيليكون-سـيليكون إلكترونا فـقط، لكن فى نفس الوقت تولد رابطة مفقودة أو فـراغ شاغر فى نظام الروابط. إذا فكرنا على غرار نموذج الروابط فستتخيل حركة الرابطة المفقودة هذه من مـوضع لآخر فى الشبيكة كلما قفز إلكترون من رابطة مجـاورة ليمـلأ الرابطة المكسورة تاركـا خلفه رابطة مكسورة أخـرى (انظر الشكل (٢-٧جـ).

بديلا عن تلك الصـورة يمكننا تصـور نفس الشىء من خلال نموذج نطاق الطـاقة على أنه إزالة إلكترون تكافؤ من نطاق التكافؤ المـمتلئ بعدد مهول (4N) من إلكترونات التكافؤ.

تتحرك الحالة الخالية الموجودة ضمن محـيط ضخم من الحالات المشغولة كحركة فقاعة فى سائل- فى حرية تامة داخل الشبيكة فى عكس اتجاه الحركة التعاونية لعدد كبير من إلكترونات نطاق التكافؤ. فسواء تحدثنا عن رابطة مكسورة فى نموذج الروابط أو عن حالة خالية فى نطاق التكافؤ فنحن إزاء نفس الكائـن: الشغرة- الحاملة الأخرى بجانب الإلكترون.

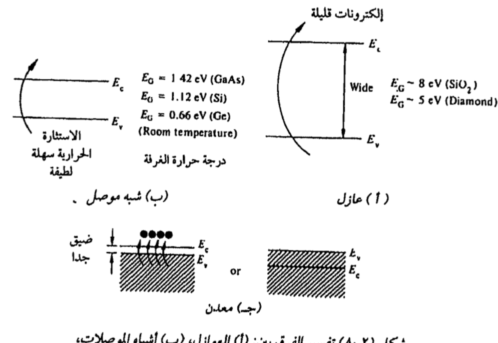
وبرغم أن ذلك ربما لا يكون واضحا من المقدمة السابقة، لكن الشغرة فى نطاق التكافؤ والإلكترون في نطاق التوصيل لهما نفس الدرجة من الأهمية. فالإلكترونات والشغرات تشارك معا فى عمل النبائط شبه الموصلة. وربما فى بعض النبائط قد نجد أن الشغرة هى الحاملة الرئيسية فى النبيطة. وكلما توغلنا بدراستنا فى نمذجة الحاملات سيتضح لنا تصور أكبر وهو تساوى أهمية كل من الشغرات والإلكترونات، وسنجد أن من الشائع أن نتصور الشغرة كأنها جسيم تحت ذرى.

٢-٢-٤ فجوة النطاق وتصنيف المواد

Band Gap and Material Classification

نختم الفقرة ٢ باستكشاف علاقة هامة بين فجوة الطاقة، وعدد الحاملات المتاحة للانتقال وتصنيف المادة البلّورية. تخبرنا فيزياء الحالة الجامدة أن نموذج نطاق الطاقة يمكن أن يطبق على مواد أخرى غير أشباه الموصلات بعد إجراء تعديلات بسيطة. الفرق الرئيسى بين المواد البلّورية ليس فى تفصيلات نطاقات الطاقة بل فى مقدار فجوة الطاقة بين النطاقين.

تتميز المواد العازلة كما هو مبين بالشكل (٢-٨ أ) بفجوة نطاق واسعة. فمثلا E_G فى حالة الماس (وهى مادة عازلة كهربيا) حوالى 5 eV وفى حالة $Si\ O_2$ حوالى 8 eV. فى مثل هذه المواد ذات فجوة الطاقة الكبيرة (أكبر من 3 eV) تكون الطاقة الحرارية عند



شكل (٢-٨) تفسير الفرق بين: (أ) العوازل، (ب) أشباه الموصلات، و(جـ) المعادن باستخدام نموذج نطاق الطاقة.

درجة حرارة الغرفة غير كافيــة، وبالتالى عدد الإلكترونات التى يمكن استثارتها من نطاق التكافؤ للتوصيل يظل ضئيــلا للغاية؛ ولذا تشكو هذه المواد من قلة الحاملات مما يجعلها مواد عازلة لا يمر فيها تيار محســوس. وبالمقارنة فإن فى حالة المعادن إما لا توجد فجوة طاقة من الأصل أو توجــد فجوة طاقــة صغيــرة جدا (E_G كسـر صغيــر من الإلكترون فولت). فى حالة عدم وجود فجوة الطاقة فإن نطـاقى التكافؤ والتوصيل يتداخـلان كمـا بالشكـل (٢-٨ ج). ونظرا لعدم وجود فجوة الطاقة فإن كل إلكترونات التكافؤ الشاغلة للمسـتويات العليا فى نطاق الـتكافؤ تعتـبر حاملات. ووجــود حاملات بهــذه الأعداد الكبيرة يجعل الفلزات جـيدة التوصيل للكهرباء. تقع أشباه الموصــلات موقعا وسطا بين العوازل والفلزات. عند درجات حرارة الغرفة $T = 300$ K تكون E_G 1.42 eV فى حالة GaAs، و 1.12 eV فى حــالة الـسـيليكون، وأخـيــرا حــوالى 0.66 eV فى حــالة الجرمانيوم.

والطاقة الحرارية فى درجــة حرارة الغرفة كــافية لاستثــارة أعداد من الإلكترونات لتصبح هناك حاملات فى نطاقى التكافؤ والتــوصيل؛ ولذا تكون قابلية توصيل التيار فى أشباه الموصلات وسطا بين العوازل والفلزات.

(٢-٣) خواص حاملات الشحنة الكهربية Carrier Properties

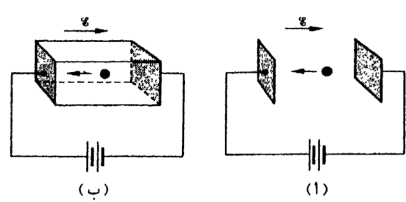
بعد أن تعرفنا على الإلكترون والشغرة سنقوم الآن بمعــرفة أقصى ما يمكن معرفته عن طبيعة هذه الحــاملات. فى هذه الفقرة بالذات سنفحص الخواص العــامة للحاملات وبعض المصطلحات.

٢-٣-١ الشحنة Charge

كل من الإلكتــرون والشغــرة كيــان مشحــون. الإلكترون له شــحنة سالــبة $-q$، والشغرة لها شــحنة موجبة $+q$، حيث $q = 1.60 \times 10^{-19}$ C. لاحظ أن q عبارة عن رقم موجب دائما.

٢-٣-٢ الكتلة الفعالة Effective Mass

الكتلة، تماما مثل الشحنة، خاصية أساسية للإلكترونات والشغرات. على عكس الشحنة، الكتلة ليست مجرد كمية عددية ثابتــة ولكنها أعقد من ذلك. فى الحقيقة كتلة الإلكترون الفعالة فى بلورة تتغير بتـغير نوع البلّورة. أى أن الكتلة الفعالة للإلكترون فى السيليكون غــير الجرمانيوم ولا تســاوى أى منهما كتلة الإلكتــرون الحر فى الفراغ والتى تساوى $m_o = 9.1 \times 10^{-31}$ kg.



شكل (٢-٩) إلكترون يتحرك تحت تأثير مجال كهربى
(أ) فى الفراغ، (ب) داخل بلورة شبه موصل

لكى نسبر غور مفهوم الكتلة الفعالة سيتعين علينا أولا أن نختبر حركة الإلكترون فى الفراغ. يتحرك الإلكترون فى الفراغ بكتلة m_o تحت تأثير المجال الكهربى $\mathcal{E}$ الناشئ بين لوحى مكثف كما هو مبين بالشكل (٢-٩ أ) القوة F التى يؤثر بها المجال هى حاصل ضرب الشحنة q فى المجال $\mathcal{E}$، من قانون نيوتن الثانى :

$$F = - q\mathcal{E} = m_o \frac{dv}{dt} \qquad (2\text{-}2)$$

حيث v هى سرعة الإلكترون، t هو الزمن، بعد ذلك سنجعل الإلكترون يتحرك بنفس الطريقة لكن داخل بلورة شبه موصل كما بالشكل (٢-٩ب).

هل ستظل المعادلة (2-2) صالحة لوصف هذه الحالة؟ الإجابة هى بالنفى. فداخل شبه الموصل سيتصادم الإلكترون دوريا بذرات شبه الموصل مما يعرضه لعجلة تقصيرية عقب كل تصادم.

سؤال آخر: هل يمكن تطبيق المعادلة (2-2) على الإلكترون أثناء تحركه بين ذرتين وقبل أن يحدث أى تصادم؟

الإجابة مرة أخرى بالنفى؛ لأن بالإضافة للمجال $\mathcal{E}$ هناك مجال كهربى آخر معقد ناتج عن ذرات البلّورة وهذا المجال الإضافى غائب من المعادلة (2-2).

المناقشة السابقة تظهر بالتفصيل الفرق بين حركتى الإلكترون فى الفراغ وفي داخل شبه الموصل. ولكن المناقشة لا توضح كيفية التعامل مع حركة الإلكترون داخل البلورة.

إذا أردنا أن نتناول الموضوع بدقة متناهية فعلينا أن ندع جانبا ميكانيكا نيوتن الكلاسيكية ونستخدم ميكانيكا الكم التي تناسب النظم الذرية. ولحسن الحظ إذا كانت

أبعاد البلّورة كبيرة بالقياس بالأبعاد الذرية (تقاس الأبعاد الذرية بالإنجشتروم) فإن المعالجة القائمة على ميكانيكا الكم يمكن اختزالها لمعادلة حركة شبيهة بالمعادلة (2-2) بعد استبدال الكتلة m_o بالكتلة الفعالة للحاملة. أى أن المعادلة التى تصف الإلكترونات المبينة بالشكل (٢-٩ ب) تكتب كالآتى:

$$F = -q\,\mathcal{E} = m_n^* \frac{dv}{dt} \qquad (2\text{-}3)$$

حيث m_n^* ترمز للكتلة الفعالة للإلكترون. ويمكن كتابة معادلة مشابهة للشغرة بعد استبدال $-q \longrightarrow +q$ و $m_n^* \longrightarrow m_p^*$. في كلتا الحالتين فإن المجالات الداخلية للبلّورة وكذلك الاعتبارات الكمية قد تم أخذها بالاعتبار من خلال استبدال كتلة الإلكترون الحر في الفراغ بالكتلة الفعالة للحاملة داخل شبه الموصل. وهذه نتيجة هامة تسمح لنا بأن نعتبر الإلكترونات والشغرات كأنها شبه جسيمات كلاسيكية ومن ثم تمكننا من استخدام علاقات الجسيمات الكلاسيكية في تحليل عمل النبائط.

وبرغم أن صياغة الكتلة الفعالة هى تبسيط كبير للأمور، نجد أن معدل تسارع الحاملة يتغير بتغير اتجاه حركتها بالنسبة لاتجاهات محاور البلّورة، أى أن الكتلة الفعالة لها قيم مختلفة حسب اتجاه الحركة أحيانا. والأكثر من ذلك فإن الخواص التي يمكن قياسها في المعمل تحدد أيضا الكتلة الفعالة، أى أن هناك كتل فعالة مختلفة للحاملة الواحدة في نفس شبه الموصل طبقا للخواص المقاسة. فمثلا توجد كتلة فعالة خاصة بالرنين السيكلتروني (حيث تدور الحاملة في مسار مغلق تحت تأثير مجال مغناطيسى عمودى على مستوى المسار). وتوجد كتلة فعالة خاصة بتجارب قياس الموصلة الكهربية، وكتلة فعالة ثالثة تدخل فى حسابات كثافة الحالات الكمية وهكذا. وربما لن تثير حقيقة أن الكتلة الفعالة تتغير أيضا بتغير درجات الحرارة دهشتنا بعد الآن. عموما الكتلة الفعالة التى سنستخدمها من الآن فصاعدا تسمى بالكتلة الفعالة المرتبطة بكثافة الحالات density of states والتى سنناقشها لاحقا (الفقرة ٢-٤-١) والجدول التالى يعطى الكتل الفعالة (الخاصة بكثافة الحالات) لكل من Si، Ge، GaAs عند درجة حرارة 300 K.

جدول (٢-١) الكتل الفعالة الخاصة بكثافة الحالات

المادة	m_n^*/m_o	m_p^*/m_o
Si	1.18	0.81
Ge	0.55	0.366
Ga As	0.066	0.52

٢-٣-٣ أعداد الحاملات في المواد الذاتية

Carrier Numbers in Intrinsic Material

يشيع استخدام مصطلح شبه الموصل الذاتى ليشير إلى عينة شبه الموصل الغاية فى النقاء والتى لا تحتوى على تركيز ذى بال من ذرات الشوائب. بدقة أكبر فإن شبه الموصل الذاتى هو العينة التى خواصها هى الخـواص الأصلية لمادة شبه الموصل، الخواص الذاتية التى لم تشوهها إضـافات خارجية. وعـدد الحاملات فى شبه موصل ذاتى هى خـاصية ذاتية لشبه الموصل نفسه.

نكتب بصفة عامة التعريفين :

n عدد الإلكترونات لكل cm^3

و p عدد الشواغر لكل cm^3 الموجودة داخل شبه موصل. فى شبه الموصل الذاتى تحت ظروف الاتزان.

$$n = p = n_i \qquad (2\text{-}4)$$

العدد n_i عند درجة حرارة الغرفة

$$n_i = \begin{cases} 2\times10^{6}\ /\mathrm{cm}^3 & \text{فى GaAs} \\ 1\times10^{10}\ /\mathrm{cm}^3 & \text{فى Si} \\ 2\times10^{10}\ /\mathrm{cm}^3 & \text{فى Ge} \end{cases}$$

تتســاوى n و p فى شبـه الموصل الذاتى لأن فـى المادة فـائقـة النقـاء تتـولد الإلكترونات والشـغرات أزواجا. بالرجوع للـشكل (٢-٧) سنرى أنه إذا انكسرت رابطة شبـه موصل فإن إلكترونا حـر وشغرة يولدان معـا فى نفس اللحظة. وفى نموذج نطاق الطاقة فإن اسـتثارة إلكترون من نطاق التكافؤ ليـصبح حاملة فى نطاق التوصيل سـيترك وراءه على الفور شـغرة فى نطاق التكافؤ. برغم أن عدد الحـاملات لكل cm^3 فى شبه الموصل الذاتى يبدو كبـيرا كقيمة مطلقة فـإنه فى الواقع يعتبر ضئيـلا جدا بالمقارنة بعدد الروابط التى يمكن كسـرها بطـرق مختلـفة. فمثـلا فى السـيليـكون عـدد الـذرات هــو $5 \times 10^{22}\ /\mathrm{cm}^3$. وبما أن $n_i = 10^{10}\ /\mathrm{cm}^3$ ، إذن فى السـيليكون عند درجة حـرارة الغرفة توجد رابطة واحدة مكسورة كل 10^{13} رابطة. ربما إذا استطعنا ملء كل الصفحات البيضـاء فى العالم بمخططات نموذج الروابط سنجد مخططا وحيـدا فقط برابطة مكسورة للسيليكون الذاتى عند درجة حرارة الغرفة.

٢-٣-٤ مناولة أعداد الحاملات - الإشابة

Manipulation of Carrier Numbers - Doping

الإشابة أو التطعيم كمصطلح مرتبط بشبه الموصلات، هو إضافة كميات محكومة من ذرات شوائب معينة بقصد زيادة تركيز الإلكترونات أو الشغرات والمقصود بالتركيز هو عدد الأشياء لكل cm^3. هذه الإضافة للكميات المتحكم بها تحدث روتينيا أثناء تصنيع أغلب النبائط شبه الموصلة. والشوائب الشائعة فى حالة السيليكون موضحة بالجدول ٢-٢.

جدول (٢-٢) الشوائب الشائعة للسيليكون

السهم يشير للشوائب الأوسع استخداما

المانحات (شوائب تزيد الإلكترونات)		المتقبلات (شوائب تزيد الشغرات)	
عناصر من العمود الخامس	P ← As ← Sb	عناصر من العمود الثالث	B ← Ga In Al

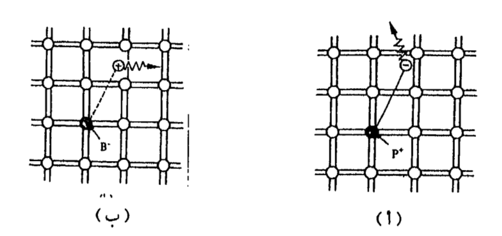
لزيادة تركيز الإلكترونات يمكن للمرء أن يضيف الفسفور P أو الزرنيخ As أو الأنتيمون Sb إلى بلورة السيليكون، وللعلم فإن أكثرها شيوعا هو الفسفور ويليه مباشرة الزرنيخ. أما إذا أردنا زيادة تركيز الشغرات بالسيليكون نضيف البورون B (وهو الأكثر استخداما)، أو الجاليوم Ga، أو الإنديوم In، أو الألومنيوم Al.

. لكى نتفهم كيف أن إضافة ذرات الشوائب تقوم بالتحكم بأعداد الحاملات، علينا أن نلاحظ أن كل المانحات تنتمى للعمود الخامس بالجدول الدورى وكل المتقبلات تنتمى للعمود الثالث بالجدول الدورى.

وكما هو موضح بالشكل (٢-١٠ أ) الذى يصور نموذج روابط فى حالة استبدال ذرة سيليكون بذرة من العمود الخامس بها خمسة إلكترونات تكافؤ. ترتبط أربعة من هذه الإلكترونات بجيرانها كالمعتاد بينما لا يجد الإلكترون الخامس مكانا له فى نظام الروابط (تذكر أنه توجد فقط أربع من الذرات الأقرب جيرة) وبالتالى يكون ارتباطه بالذرة المانحة ضعيفا لدرجة أنه فى درجة حرارة الغرفة تتوافر طاقة حرارية كافية لجعل

أعداد كبيرة من هذه الإلكترونات (الخامسة) تتحرر وتصبح حاملات تتجول بحرية في البلورة. ونلاحظ أن هذا المنح (من هنا تجيء تسمية مانحات) للحاملات الإلكترونات لن يزيد تركيز الشغرات. الأيون المانح (الذى هو ذرة مانحة بعد أن تحرر منها إلكترونها الخامس وأصبحت أيونا موجبا) لن يتحرك من موضعه، وبالتالى لا يصبح حاملا للتيار، كما أنه لن تنكسر روابط (من نوع رابطة ذرة ـ ذرة) عند تحرير الإلكترون الخامس.

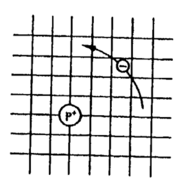
يسير شرح عمل المتقبلة وفقا لنفس المنطق. فمتقبلات العمود الثالث لها ثلاثة إلكترونات تكافؤ، وبالتالى عندما تحل ذرة متقبلة محل ذرة سيليكون، ستبقى رابطة مكسورة (أى بدون إلكترون تكافؤ) كما بالشكل (٢-١٠ ب) ذرة العمود الثالث ستتقبل (ومن هنا تسمية المتقبلة) إلكترونا من رابطة سيليكون-سيليكون مجاورة لكى تملأ رابطتها المكسورة (من هنا تتولد شغرة قادرة على التحرك فى كل البلورة (وتصبح حاملة موجبة الشحنة). هنا أيضا تحدث إضافة حاملة من نوع واحد دون النوع الآخر (توليد شغرة بدون توليد إلكترون). الأيون المتقبل السالب لن يتحرك من مكانه، وبالتالى لا يلعب دور حامل التيار كما أن عملية التقبل لم تولد إلكترونا حرا.



شكل (٢-١٠) تصوير فاعلية (أ) مانحة، و (ب) متقبلة باستخدام نموذج الروابط. فى (أ) ذرة عنصر الفسفور (العمود الخامس) حلت محل ذرة سيليكون، وفى (ب) ذرة بورون (العمود الثالث) حلت محل ذرة السيليكون

التفسير السابق المبنى على نموذج الروابط مفهوم بشكل معقول ولكنه يترك بعض الأمور معلقة. أحدها أننا ذكرنا أن الإلكترون الخامس يرتبط ضعيفا بالذرة المانحة وفي نفس الوقت يمكنه التجول بحرية خلال البلورة. فكيف يمكن تعريف مصطلح

«يرتبط بضعف»؟، أيضا يجب أن نعرف أنه عند درجة الحرارة T يتوفر لكل جسيم طاقة حرارية قيمتها المتوسطة kT حيث k هو ثابت بولتزمان. عند درجة حرارة الغرفة يبلغ متوسط الطاقة الحرارية حوالى $\frac{1}{40}$ من الإلكترون ڤولت. وتحتاج رابطة سيليكون-سيليكون طاقة مقدارها Eg لكى تنكسر أى حوالى 1eV، وبالتالى لا ينكسر سوى عدد صغير من هذه الروابط عند $T = 300\ K$ (حوالى $n_i = 10^{10}$ رابطة مكسورة). فهل مصطلح «مرتبطة بضعف» يعنى طاقة ربط حوالى 0.1 eV أو أقل؟ ربما، سؤال آخر: كيف يمكن تصوير فعل ذرات الإشابة باستخدام نموذج نطاق الطاقة؟ السؤالان مرتبطان بعضهما ببعض؛ لأنهما يتناولان اعتبارات الطاقة.



شكل (٢-١١) نموذج شبيهة ذرة الهدروجين لوصف رابطة موضع مانحة

دعونا نركز أولا على طاقة ربط الإلكترون الخامس. يمكن القول مجازا أن لب الذرة المانحة المشحونة بالإضافة للإلكترون الخامس يشبهان ذرة الهدروچين. لب الذرة المانحة يعمل كنواة ذرة الهدروچين (كما بالشكل ٢-١١) والإلكترون الخامس كإلكترون ذرة الهدروچين. طبعا فى ذرة الهدروچين الحقيقية يتحرك الإلكترون فى الفراغ، وبالتالى فإن كتلته هى كتلة الإلكترون الحر فى الفراغ m_o، وطبقا للمعادلة 1-2 فإن طاقة الربط للحالة الأرضية هى 13.6 eV. أما فى حالة الذرة المشابهة (اللب + الإلكترون الخامس) تستبدل سماحية الفراغ ε_o بسماحية السيليكون $K_s\varepsilon_o$، أيضا تستبدل الكتلة m_o بالكتلة الفعالة فى السيليكون m_n^*؛ لأن الإلكترون الخامس يتحرك داخل بحر من ذرات السيليكون وليس فى الفراغ. نستنتج بالتالى أن طاقة ربط (E_B) إلكترون المانحة الخامس هى تقريبا

$$E_B \simeq \frac{m_n^* q^4}{2(4\pi K_s \varepsilon_o \hbar)^2}$$

$$= \frac{m_n^*}{m_o} \frac{1}{K_s} (13.6\ \text{eV}) \approx 0.1\ \text{eV} \qquad (2\text{-}5)$$

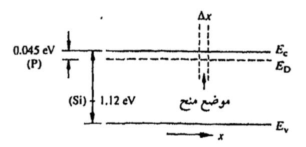
حيث K_s هو ثابت العزل dielectric constant للسيليكون (K_s=11.8). طاقات الربط الفعلية للمانحات موضحة بالجدول الآتى:

جدول (٢-٣) طاقة الربط بمواضع المنح بالإلكترون فولت

المانحات	$\lvert E_B \rvert$	المتقبلات	$\lvert E_B \rvert$
Sb	0.039	B	0.045
P	0.045	Al	0.087
As	0.054	Ga	0.072
		In	0.16

طاقات الـربط الفعليـة والتى قيـست معـمليا تتـماشى إلى حـد ما مع التـقدير المحسوب من المعادلة (2-5) وتساوى تقريبا 1/20 من الإلكترون فولت (القيمة المحسوبة حوالى 1/10 من الإلكترون فولت).

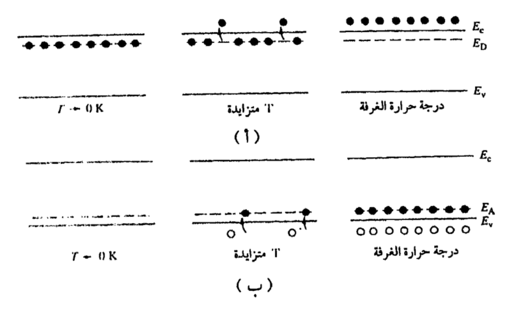
بعد تقدير طاقات الربط كميا ننتقل الآن لمعالجة مسألة كيفية تصوير فعل المانحات من خلال نموذج نطاق الطاقة. نلاحظ أولا أن الإلكترون الخامس يحتاج لطاقة E_B لكى يترك موضع المنح وليظهـر فى نطاق التوصيل كحاملة. فإذا توافـر لهذا الإلكترون طاقة E_B بالضبط، أمكنه الوصول بالكاد إلى قاع نطاق التوصيل أى إلى المستوى E_C. ويقودنا هذا إلى التسليم بأن الإلكتـرون الخامس أثناء ارتباطه بالذرة المانحـة له سيحتل مـستوى طاقة مســموح به ويقع بالضبط تحت E_C بمقدار E_B، أو كما هو مبين بالشكل (٢-١٢)



شكل (٢-١٢) إضافة مستوى طاقة مانحة $E = E_D$ لمخطط طاقة النطاق، علامات الشرطة باتساع Δx تؤكد على طبيعة أن حالات مواضع المانحات موضعية أى تمتد لمدى محدود

يمكن توصيف مـواضع المنح خلال نموذج نطاق الطاقة بإضافـة مستويات إلكتـرونية عند الطاقة $E_D = E_C - E_B$. لاحظ أن مسـتوى طاقة المانحـة يُرسم على هيئة خط مـتقطع وتعنى كل شرطة فى الخط إلى أن الإلكترون المنتمى للمانحة سيكون مقيدا ويبقى مجال حركـته محدودا بموضع المنح طالمـا أنه لم ينطلق بعد. وأنه فقط عندمـا ينال طاقة E_B، يصبح طليقا ويكون الفرق $E_C - E_D$ هو E_B ويقدر بحوالى eV (1/20)، وبالتالى يكون المستوى E_D قريبا جدا من المستوى E_C (تذكر أن $E_C - E_V$ يساوى E_G أى 1.12 eV).

التصور الشائع لفعل المنح من خلال نموذج نطاق الطاقة موضح بالشكل (٢-١٣أ) بالناحية اليسرى من الشكل، نجد أن كل مواضع المانحـات مشغولة بالإلكترونات المقيدة



شكل (٢-١٣) تصوير فعالية (أ) مانحة و (ب) متقبلة باستخدام نموذج نطاق الطاقة

وذلك عند انخفاض درجات الحرارة $T \to 0\ K$. وهذا ما يحدث فى الواقع؛ لأنه عند درجات الحرارة المنخفضة لا تتوفر طاقة حرارية كافية (kT) لاستثارة الإلكترونات المقيدة بمواقع المانحات إلى نطاق التـوصيل. ويبدأ الوضع فى التـغير مع ارتفاع درجـة الحرارة فنجد أن المزيد من الإلكترونات المقـيدة يتحرر نحو نطاق التـوصيل (انظر الجزء الأوسط فى الشكل). وعند درجـة حـرارة الغـرفة تتـأين كل الذرات المانحـة بعـد أن تمنح كل إلكتروناتها الخامسة لنطاق التوصيل. (الجزء الأيمن بالشكل). بالرغم من أننا ركزنا على المانحـات إلا أن نفس الشىء يـسرى عـلى المتـقبـلات. فكـما هـو واضح من الشكل (٢-١٣ب) فإن المتقبلات تنشئ مستويات ذرية مسموحا بها فوق سقف نطاق التكافؤ E_V مباشـرة وداخل فجوة الطاقة عند درجـات الحرارة المنخفضة كل المواضـع تكون خالية

لعدم وجود طاقة حرارية كافية عندما تئول T إلى الصفر المطلق لنقل إلكترون تكافؤ إلى موضع المتقبلة. ومع ارتفاع درجة الحرارة يزداد عدد إلكترونات التكافؤ التى تقفز للروابط غير المكتملة للذرات المتقبلة. وكل إلكترون يقفز لذرة متقبلة يخلق مكانه شغرة، أى أن انتزاع الإلكترونات من نطاق التكافؤ يخلق شغرات بالطبع. وعند درجة حرارة الغرفة تمتلئ تقريبا كل مواضع المتقبلات بإلكترونات التكافؤ ونتيجة لذلك يزداد تركيز الشغرات بالمادة.

قبل أن نختتم هذه الفقرة الفرعية نود أن ننوه ببضع كلمات عن إشابة أشباه الموصلات غير العنصرية (أى المركبة مثل GaAs). إشابة شبه موصل مثل GaAs تشبه إشابة السيليكون فيما عدا بعض التعقيدات بسبب وجود موضعين مختلفين لذرتى المركب. فالذرات من العمود السادس (VI) مثل الكبريت S، والسيلينيوم Se، والتيلوريوم Te، -وكما رأينا فى حالة السيليكون- تلعب دور المانحات عندما تحل محل ذرة الزرنيخ (التى تنتمى للعمود الخامس) فى GaAs. وبالمثل ذرات العمود الثانى مثل البيرليوم Be، والمغنسيوم Mg، والزنك Zn تقوم بدور المتقبلات إذا ما استبدلت ذرة الجاليوم (من العمود الثالث) فى GaAs. لكن ينشأ وضع جديد إذا حلت ذرة من العمود الرابع (سيليكون أو جرمانيوم) فى GaAs. يحل السيليكون عادة محل الجاليوم؛ ولذا يعتبر مانحا مشهورا لإشابة GaAs، ولكن تحت شروط معينة يمكن للسيليكون أن يحل محل الزرنيخ فى GaAs ليلعب دور المتقبل. فى الحقيقة وصلات *pn* فى زرنخيد الجاليوم (GaAs) تصنع بإضافة السيليكون ليؤدى وظيفة المانح فى الناحية *n* ووظيفة المتقبل بالناحية *p*. تسمى الشائبة التى يمكن أن تقوم بدور المانح والمتقبل معا بالشائبة الأمفوتيرية amphoteric.

مثال ١-٢ :

أسئلة سريعة عن الطاقة :

أ - كم يساوى 1eV مقدرا بالچول ؟

ب- كم تساوى kT بالإلكترون فولت عند 300 K؟

جـ- E_G (Si) تساوى ـــــــ ؟

د - E_G (Si O_2) تساوى ــــ ؟

هـ- طاقة التأين للمتقبلات والمانحات فى السيليكون تساوى تقريبا ــــ ؟

و - الطاقة اللازمة لتأيين ذرة هدروچين فى الحالة الابتدائية n =1 هى ــــ ؟

الإجابة :

أ - $1\ eV = 1.60 \times 10^{-19}$ joules

ب- عند $T = 300\ K$: $kT = (8.617 \times 10^{-5})\ (300)$

$= 0.0259\ eV$

(هنا استعملنا ثابت بولتزمان $k = 8.617 \times 10^{-5}\ eV/K$).

جـ- من المقطع الفرعى ٢-٢-٤ : $E_G(Si) = 1.12\ eV$.

د - وأيضا $E_G\ (Si\ O_2) \approx 8\ eV$.

هـ- طاقة التأيين للشوائب تساوى (E_B) والتى بدورها تساوى تقريبا 0.1 eV فى السيليكون.

و - من المعادلة 1-2 فى الفقرة ٢-١ طاقة التأيين لذرة الهدروچين هى:

$E_H |_{n=1} = 13.6\ eV$.

٢-٣-٥ مصطلحات متعلقة بالحاملات Carrier-Related Terminology

من المناسب أن نختم هذه الفقـرة بمراجعة عامة للمصطلحات المتـعلقة بالحاملات وتعريفـاتها، هذه المصطلحات واسعـة الاستخـدام وتعريفاتها يجب أن تحـفظ عن ظهر قلب.

- المشيبات (المطعمات) *Dopants*

هى ذرات شوائب خـاصة تضاف لشبـه الموصل بمقادير بالغة الدقـة بغرض زيادة تركيزات أى من الإلكترونات أو الشغرات.

- شبه الموصل الذاتى *Intrinsic semiconductor*

هى عينة شبـه الموصل التى لم تشاب والبالغة النقاء ولا تحـتوى على أى شوائب تستحق الذكر، وبالتالى فإن خواصها هى خواص شبه الموصل ذاته دون انتهاك.

- شبه الموصل المكتسب *Extrinsic semiconductor*

هو شبه الموصل المشاب والذى اكتسب خـواص جديدة بعد إضافة ذرات شوائب إليه.

- المانحة *Donor*

هى ذرة شائبـة تزيد تركيـز الإلكترونات فى شبـه الموصل ويقال لهـا شـائبة من النوع n.

- المتقبلة **Acceptor**

هى ذرة شائبة تزيد تركيز الشغرات وتسمى شائبة من النوع *p*.

- مادة من نوع n ***n-type material***

هى المادة المشابة بالمانحات، وهى شبه موصل فيه الإلكترونات أكثر وفرة من الشغرات.

- مادة من نوع p ***p-type material***

هى المادة المشابة بالمتقبلات، وهى شبه موصل فيه الشغرات أكثر وفرة من الإلكترونات.

- حاملة أقلية ***Minority carrier***

الحاملة الأقل عدد فى عينة شبه الموصل، الشغرات فى مادة من النوع *n*، والإلكترونات فى مادة من نوع *p*.

- حاملة أغلبية ***Majority carrier***

الحاملة الأكثر عددا فى عينة شبه الموصل، الإلكترونات فى مادة من النوع *n*، والشغرات فى مادة من نوع *p*.

(٢-٤) توزيعات الحالات والحاملات

State and Carrier Distributions

حتى الآن ركزنا عند اهتمامنا بعملية النمذجة على خواص ومعلومات عن الحاملات على مستوى المفاهيم والمعالجة النوعية أو شبه الكمية على الأكثر. من الناحية العملية توجد حاجة لمعلومات تفصيلية أكثر. مثلا معظم أشباه الموصلات مشابة ومن المهم روتينيا أن نعرف بدقة القيم العددية لتركيزات الحاملات داخل أشباه الموصلات المشابة، كذلك نحتاج لفحص خاصية هامة ألا وهى توزيع الحاملات كدالة فى الطاقة، لكل نطاق على حدة. فى هذه الفقرة نبدأ بتفصيل أكثر عملية تطوير وصف التعداد السكانى للحاملات. سيؤدى هذا التطوير فى النهاية إلى علاقات تحصى توزيعات الحاملات وتركيزاتها داخل شبه الموصل تحت ظروف الاتزان.

٢-٤-١ كثافة الحالات Density of States

عند تقديم نموذج نطاق الطاقة لأول مرة فى الفقرة ٢-٢ أشرنا إلى أن العدد الكلى للحالات المسموح بها فى كل نطاق هو أربعة أمثال عدد ذرات البلورة، لكننا لم نذكر كيف تتوزع هذه الحالات مع الطاقة، أى ما هو عدد الحالات الواقعة فى مدى طاقة معين داخل نطاق التكافؤ أو التوصيل. حان الآن وقت الاهتمام بهذا التوزيع للحالات عند قيم مختلفة للطاقة أى بكثافة الحالات وهو الاسم الشائع لهذا التوزيع، فمعرفة هذا التوزيع أساسى لتحديد توزيع الحاملات وتركيزاتها.

لتحديد كثافة الحالات المطلوبة من الضـروري أن نجرى تحليلا مبنيا على اعتبارات ميكانيكا الكم.

سنعطى هنا نتـيجة هذا التحـليل بإيجاز، فالطاقـات التى ليست بعيـدة جدا عن حواف النطاقين نجد أن :

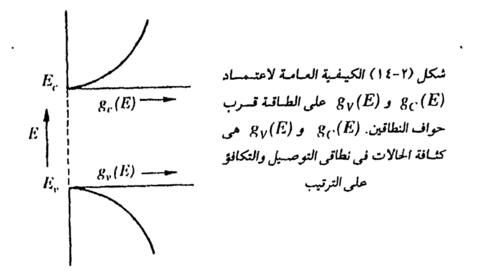
$$g_C(E) = \frac{m_n^* \sqrt{2\, m_n^* (E-E_C)}}{\pi^2\ \hbar^2} \qquad , E \geq E_C \qquad \text{(2-6-a)}$$

$$g_V(E) = \frac{m_p^* \sqrt{2\, m_p^* (E_V-E)}}{\pi^2\ \hbar^2} \qquad , E \geq E_V \qquad \text{(2-6-b)}$$

حيث $g_C(E)$ و $g_V(E)$ هما كـثافتا الحـالات عند الطاقة E في نطاق التوصيل والتكافؤ على التوالى.

ما الذى يجب بالضبط معرفته وتذكره حول كثافة الحالات المذكورة أعلاه؟ أولا، يجب استيعاب المفهوم العام لكثافة الحالات. يمكن تشبيه كثافة الحالات بتوصيف المقاعد فى الاستـاد، حيث إن عدد المقـاعد التـى تبعد مسـافة معينة من المـلعب ستناظر عـدد حالات الطاقـة الواقعـة داخـل مـدى معين، وهذا المدى يبـعـد عن E_C أو E_V بطاقة معينة E.

ثانيا، يجب مـلاحظة الشكل العام للمـعادلة (2-6) وكمـا هو موضح بالشـكل (٢-١٤) $g_C(E)$ تساوى صفرا عند $E = E_C$ وبعد ذلك تزيد كدالة جـذر تربيعى كلما



شكل (٢-١٤) الكيـفـية العـامـة لاعتـمـاد $g_C(E)$ و $g_V(E)$ على الطـاقـة قـرب حواف النطاقين. $g_C(E)$ و $g_V(E)$ هى كثـافة الحالات فى نطاقى التوصـيل والتكافؤ على الترتيب

صعدنا لأعلى فى نطـاق التوصيل. وبالمثل $g_V(E)$ تساوى صـفر تماما عندما $E = E_V$ وتتزايد كجذر تربيعى كلما نزلنا لأسفل فى نطاق التكافؤ. لاحظ أن الفرق بين $g_C(E)$ و $g_V(E)$ ناتج عن اختلاف الكتل الفعالة فى الحالتين. ولو تساوت الكتل فإن $g_C(E)$ و $g_V(E)$ ستتساويان.

أخيرا لنأخذ المدى الصغير جدا بين الطاقة E والطاقة $E + dE$ فى النطاقين، يمكننا القول أن :

$g_C(E)dE$ تمثل عدد حالات نطاق التوصيل لكل cm^3 والواقعة بين E، $E + dE$ إذا كانت $E \geq E_C$.

$g_V(E)dE$ تمثل عدد حالات نطاق التكافـؤ لكـل cm^3 والواقعة بين E، $E + dE$ إذا كانت $E \leq E_V$.

إذن $g_C(E)$ و $g_V(E)$ هما عدد لكل وحدة حجم لكل وحدة طاقة وعادة ما يعبر عنهما بالوحدة number / cm^3 eV.

٢-٤-٢ دالة فرمى The Fermi Function

بينما تخبرنا كثافة الحالات بعدد الحالات المسموح بها عند طاقة معينة E، سنجد أن دالة فرمى $f(E)$ هى التى تحـدد احـتمـال احـتلال أى حـالة من هذه الحـالات بأى إلكترون، أى أن:

$f(E)$ تحدد تحت ظروف الاتزان احتمـال أنه توجد حالة متاحة (أى مـسموح بها) عند الطاقة E ستشغل بإلكترون.

رياضيا، دالة فرمى ببساطة هى دالة التوزيع الاحتمالى. والتعبير الرياضى لها هو:

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}} \tag{7-2}$$

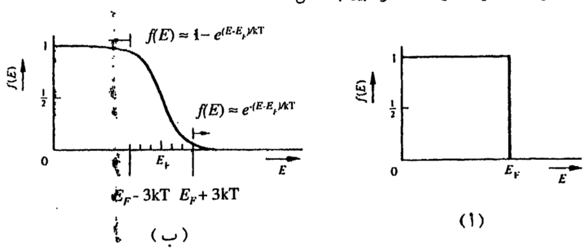
حيث إن :

E_F هى ثابت طاقة فرمى أو مستوى فرمى.

k ثابت بولتزمان $k = 8.617 \times 10^{-5}$ eV/k.

T درجة الحرارة المطلقة بالكلفن K.

ولكى نسبر غور طبيعة دالة فرمى؛ دعونا نبدأ ببحث تغير هذه الدالة مع الطاقة E. نبدأ بدرجات الحرارة المنخفضة أى عندما $T \to 0$ K فإن $-\infty \to (E-E_F)/kT$ لكل الطاقات $E < E_F$ كما أن $(E-E_F)/kT \to +\infty$ لكل الطاقات $E > E_F$، بالتالى $f(E < E_F) \to 1 / [1 + e^{-\infty}] = 1$، وكذلك $f(E > E_F) \to 1/[1+e^{\infty}]=0$ أى أنه عند $T = 0$ K يحدث هبوط مفاجئ من 1 إلى 0، وبالتالى فإن الحالات التى لها $E < E_F$ كلها تكون مشغولة، $(f=1)$ والحالات التى طاقتها $E > E_F$ كلها خاوية،$(f = 0)$ وذلك عند درجة حرارة الصفر المطلق. كما هو مبين بالشكل (٢-١٥ أ).



شكل (٢-١٥) اعتماد دالة فرمى على الطاقة
(أ) عندما $T \to 0$ K
(ب) المنحنى العام عند $T > 0$ K

ننتقل الآن إلى درجة الحرارة $T > 0$ K، بالنظر مليا لدالة فرمى سنلاحظ عدة أمور:

١- إذا كان $E = E_F$ إذن $f(E_F) = 1/2$.

٢- عندما $E \geq E_F + 3kT$ فإن $\exp[(E-E_F)/kT]$ تصبح أكبر كثيرا من الواحد الصحيح، وبالتالى $f(E) \approx e^{-(E-E_F)/kT}$ أى أن فوق $E_F + 3kT$، فإن احتمال إشغال مستوى الطاقة سيضمحل أسيا إلى الصفر مع زيادة الطاقة. ونستنتج أن معظم الحالات التى طاقتها أعلى بمقدار 3kT فوق E_F ستكون خالية.

٣- بالعكس عندما $E \leq E_F - 3kT$ فإن $\exp[(E-E_F)/kT] << 1$، وبالتالى $f(E) \approx 1 - \exp[(E-E_F)/kT]$، بالتالى عندما تكون الطاقة E أقل من $E_F - 3kT$ فإن

احتمال أن تكون حالة الطاقة خالية سيئول أسيا للصفر مع نقصان الطاقة. أى أن معظم الحالات التى طاقتها تحت E_F بمقدار $3kT$ ستكون مشغولة.

٤- عند درجة حرارة الغرفة ($T = 300K$) فإن $kT = 0.0259$ eV و$3kT=0.0777$eV أى أن: $3kT<<E_G$ (Si) أى أنه بالمقارنة بفجوة طاقة السيليكون فإن $3kT$ - التى تلعب دورا هاما فى تصرف الدالة $f(E)$- هى فى الواقع حزام ضيق من الطاقة.

الخواص التى فرغنا للتو من سردها للدالة $f(E)$ تظهر جليا ويلخصها الرسم المعروض فى الشكل (٢-١٥ ب).

قبل أن نختم المناقشة هنا نعيد التأكيد على أن دالة فرمى تطبق فقط فى ظروف الاتزان ولا بد أن نذكر أن دالة فرمى عامة جدا، بمعنى أنها تنطبق على كل المواد - عازلة، شبه موصلة، موصلة، وبالرغم أننا تناولناها هنا فى سياق أشباه الموصلات لكنها فى الحقيقة لا تتغير بتغير نوع شبه الموصل فهى دالة إحصائية تنطبق على كل النظم الإلكترونية، وأخيرا فإن موضع مستوى فرمى E_F بالنسبة لحواف النطاقين E_C، E_V هو موضوع هام ونعالجه فى المقاطع الفرعية اللاحقة.

مثال ٢-٢:

نفترض أن الحالة التى عند الحافة E_C احتمال إشغالها يساوى احتمال خلو الحالة عند الحافة E_V. أين يقع مستوى فرمى؟

الحل:

$$f(E_C) = 1 - f(E_V)$$

لكن:

$$f(E_C) = \frac{1}{1 + e^{(E_C - E_F)/kT}}$$

وأيضا:

$$1 - f(E_V) = 1 - \frac{1}{1 + e^{(E_V - E_F)/kT}} = \frac{1}{1 + e^{(E_F - E_V)/kT}}$$

إذن نستنتج أن:

$$\frac{E_C - E_F}{kT} = \frac{E_F - E_V}{kT}$$

أى:

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2}$$

مستوى فرمى فى منتصف المسافة بين E_V و E_C.

مثال ٢-٣:

اكتب برنامج حاسب باللغة التى تعرفها لرسم $f(E)$ عند درجات الحرارة 100،

200، 300 كلفن، اجعل المحـور الأفقى هو $E = E - E_F$ وحدود E من $-0.2V$ إلى $+0.2V$. اجعل كل المنحنيات فى مخطط واحد.

الحل :

إذا اخترنا لغة البرمجة Matlab فإن البرنامج والرسم يكونان كالتالى :

برنامج مثال (٢-٣)

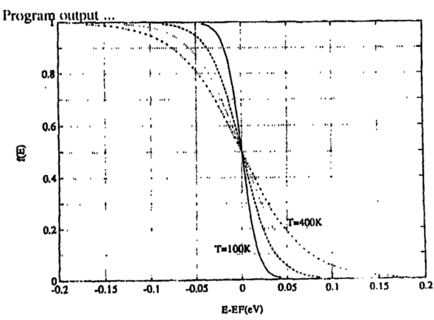
S: MATLAB program script . . .

```
%Fermi Function Calculation, f(ΔE,T)

% Constant
k=8.617e-5;

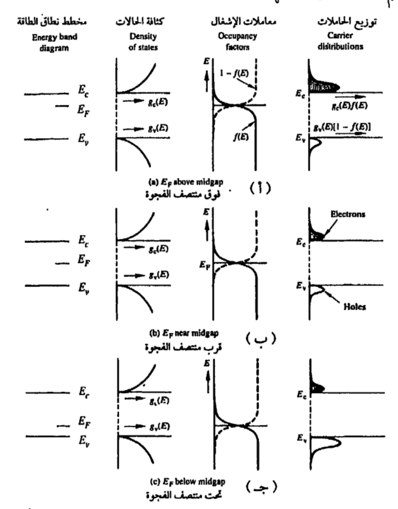
%Computation proper
for ii=1:4;
  T=100*ii;
  kT=k*T;
  dE(ii,1)=-5*kT;
  for jj=1:101
       f(ii,jj)=1/(1+exp(dE(ii,jj)/kT));
       dE(ii,jj+1)=dE(ii,jj)+0.1*kT;
  end
end
dE=dE(:,1:jj);   %This step strips the extra dE value
close
plot(dE',f'); grid;   %Note the transpose (') to form data columns
xlabel('E-EF(eV)');   ylabel('f(E)');
text(.05,.2,'T=400K');   text(-.03,.1,'T=100K');
```

Program output ...



٢-٤-٣ توزيع الاتزان للحاملات Equilibrium Distribution of Carriers

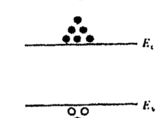
بعد أن أرسينا قواعد توزيع حالات النطاق المتاحة، وكذلك احتمال إشغالها تحت ظروف الاتزان، أصبح فى مقدورنا الآن أن نستنبط توزيع الحاملات كلٍ فى نطاقه. وبالتحديد فإن التوزيع المطلوب يمكن الحصول عليه ببساطة كحاصل ضرب كثافة الحالات المناسبة فى احتمال الإشغال المناسب مثلا: $g_C(E)f(E)$ يعطى توزيع الإلكترونات فى نطاق التوصيل كما أن: $g_V(E)[1-f(E)]$ سيعطى توزيع الشغرات (أى الحالات الخالية) فى نطاق التكافؤ. ويصور شكل (٢-١٦) عينات من توزيع الحاملات لأوضاع ثلاثة مختلفة لمستوى فرمى (وكذلك مخطط نطاق الطاقة المرتبطة بها ورسم دالة فرمى ورسم كثافة الحالات كلها.



شكل (٢-١٦) توزيع الحاملات (ليست مرسومة بمقياس رسم موحد) فى كل نطاق على حدة عندما يقع مستوى فرمى
أ - فوق منتصف الفجوة. ب- قرب منتصف الفجوة. جـ- تحت منتصف الفجوة.
موضح أيضا بالتناسق منحنيات لمخططات نطاق الطاقة، كثافة الحالات، ومعاملات الإشغال (دالة فرمى و واحد صحيح ناقص دالة فرمى)

بفحـص الشكل (٢-١٦) سنجد بصـفة عـامة أن كل توريعـات الحامـلات تئول للصفر عند حافتى النطاقين ثم تصل لأقـصى مدى لها قرب هاتين الحافتين E_C أو E_V، وبعد ذلك تضمحل سريعا للصفر عندما نتحرك لأعلى فى نطاق التوصيل أو لأسفل فى نطاق التكافـؤ. أى أن أغلب الحامـلات تتجـمع فى حزام طاقـة صغـير قـرب حافـتى النطاقين. النقطة الأخرى نلاحظ تأثيـر موضع مستوى فرمى على المقـدار النسبى لتوزيع الحاملات. إذا كان E_F قريبا من E_C (أى فوق منتصـف المسافة بين E_C و E_V) نجد أن توزيع الإلكترونات يفـوق عددا توزيع الشغـرات، السبب فى هذا هو دالة فـرمى عندما تكون E_F بالنصف العلوى لفـجوة الطاقة يضـمحل احتـمال إشغـال الإلكترونات $f(E)$ بدرجة أقل بكثير من اضمحلال احتمال وجود شاغرة $[1-f(E)]$ أى أن قيمة $f(E)$ حيث E تنتمى لنطاق التوصيل أكبـر بكثير من قيمة $1-f(E)$ حيث E تنتمى لنطاق التكافؤ فى حالة تواجد E_F فوق منتـصف الفجـوة. عندما يكون E_F قريبـا من منتصف الفـجوة يتساوى الـعاملان $f(E > E_C)$ و $1-f(E<E_V)$، وبالتالى يكون تـوزيع الإلكترونات فى نطاق التوصيـل والشغرات فى نطاق التكافؤ مـتساويين. وإذا هبط E_F لتصبح قريبا من E_V تنعكس الأمور ويزداد توزيع الشغرات بالمقارنة بتوزيع الإلكترونات. طبعا المنطق هنا يفتـرض أن التوزيعين $g_C(E>E_C)$ و $g_V(E-E_V)$ متـقاربان من حيث المقـدار، ونطمئن القارئ أن هذا الافتراض يتحقق فى حالة السيليكون (وأيضا فى الجرمانيوم) أساسا؛ لأن الكتل الفعالة للإلكترون والشغرات متـقاربتان. وطبعا نفترض هنا أن E_F داخل الفجوة وبعيدا عن الحافتين بما لا يقل عن $3kT$ أى أن $E_C - 3kT \geq E_F \geq E_V + 3kT$ (تذكر ما قلناه فى المقطع الفرعى السابق عن الاضمحلال الأسى لدالة فرمى).

تستـخدم المعلومـات التى ذكرت للتـو حول توريعـات الحامـلات ونسبـة تعداد الحـاملات بالنطاقين على نـطاق واسع، لكن غالبـا ما تـقدم هذه المعلومـات فى شكل مختـصر وموجز. فمثـلا الشكل (٢-١٧) هو أحد الطرق المعتادة لتمـثيل توزيع طاقات الحاملات.



شكل (٢-١٧) مخطط يمثل توزيع طاقة الحاملات

فالعـدد الأكبر من الدوائر أو النقط المرسومـة بجوار E_v و E_c تعكس أن القيـمة العظمى لتوزيع الحامـلات توجد قرب حافتى النطاقين وتناقص عـدد النقط كلما ارتفعنا داخل نطاق التوصيل ينمذج بشكل فج النقصان السريع فى كثافة الإلكترونات مع ازدياد الطاقة. إحدى الوسائل المستخدمة بشكل شامل للإفادة عن أعداد الحاملات فى النطاقين موضحـة بالشكل (٢-١٨)، لتمثيل مادة ذاتيـة برسم خط متقطع قرب منتـصف فجوة الطاقة ويرمـز له بالرمز E_i. وجود E_i قرب المنتصف (هنا E_i هو مستـوى فرمى E_F) ينسـجم مع ما عـرفناه سابقـا من تساوى أعـداد الإلكترونات والشـغرات عندمـا يكون مستـوى فرمى E_F قرب منتـصف فجوة النطاق. بالمثل، فـإن وجود E_F كخط مسـتمر بالنصف العلوى للفـجوة ينبـئنا على الفور أن المادة هـى شبه مـوصل من النوع n، أما وجود خط مستمر يرمز له بالرمز E_F بالنصف السفلى للفجوة فيدل على شبه موصل من النوع p. فى أشباه الموصلات المكتسبة يظهر الخط المتقطع E_i قرب منتصف الفجوة ليدل على أن شبه الموصل مكتسب (أى من النوع n أو p)، والخط E_i فى هذه الحالة يشير إلى موضع E_F إذا كانت المادة ذاتية كما أن E_i سيخدم كمـرجع لقياس الطاقة من منتصف الفجوة.

Intrinsic	n-type	p-type
E_c	E_c	E_c
	E_F	
E_i	E_i	E_i
		E_F
E_v	E_v	E_v

شكل (٢-١٨) تمثيل «بمجرد النظر» للمواد شبه الموصلة الذاتية (على اليسار)، ومن النوع n (بالوسط)، ثم من النوع P (على اليمين) باستخدام نموذج نطاق الطاقة

(٢-٥) تركيزات الحاملات عند الاتزان

Equilibrium Carrier Concentrations

وصلنا الآن لنقطة هامة بعملية نمذجة الحاملات. تجسد هذه الفقرة ذروة مجهودنا فى النمذجة، حيث تؤسس للعلاقات العملية لتركيزات الحاملات عند الاتزان متممة للمعلومات الكيفية التى قدمت عن الحاملات فى الفقرة السابقة. لسوء الحظ، فإن التأكيد على تطوير العلاقات الرياضية يجعل الهجوم على الذروة أمرا شاقا (وأحيانا مملا). نأمل أن يحتفظ قارئنا بتركيزه. ملاحظة أخرى عن تقديم أشكال بديلة لعلاقات الحاملات. هذه الأشكال البديلة يمكن تشبيهها «بمفاتيح العدة» المختلفة التى يستخدمها الحرفى عند إصلاح ماكينة عاطلة. فهو قد يستعمل عدة مفاتيح لنفس الصامولة مثل المفتوح الطرفين (الإنجليزى) أو المقفول (المشرشر) أو الأنبوبى الشكل (الماسورة أو الصامولة) فى بعض الاستخدامات يمكنه أن يستعمل أيا من المفاتيح. لكن فى استخدامات أخرى يستحسن أن يستخدم نوعا بعينه. نفس الشىء ينطبق على الأشكال البديلة. أخيرا سنضع مستطيلا حول العلاقات الهامة. المستطيل بخط مفرد يدل على أهمية متوسطة أما المستطيل بخط مزدوج فيشير للعلاقة المهمة جدا.

٢-٥-١ صيغ رياضية لقيم n, p (Formulas for n and p)

حيث إن $g_C(E)\,dE$ تمثل عدد حالات نطاق التوصيل لكل cm^3 الواقعة داخل المدى من E وحتى $E + dE$، وحيث إن $f(E)$ تمثل احتمال أن يحتل الإلكترون حالة مسموح بها عند الطاقة E، إذن فإن $g_C(E)\,f(E)\,dE$ تعطى عدد إلكترونات نطاق التوصيل لكل cm^3 الواقعة طاقتها فى المدى من E وحتى $E + dE$. وإذا كاملنا $g_C(E)\,f(E)\,dE$ على كل مدى طاقة نطاق التوصيل سنحصل على العدد الكلى للإلكترونات فى نطاق التوصيل. نستنتج إذن :

$$n = \int_{E_c}^{E_{Top}} g_c(E)\,f(E)\,dE \qquad (2\text{-}8\text{-}a)$$

$$p = \int_{E_{Bottom}}^{E_v} g_v(E)\,[1-f(E)]\,dE \qquad (2\text{-}8\text{-}b)$$

للوصول لتعبيرات واضحة لتركيزات الحاملات، سنركز مجهوداتنا على التكامل n (وسندع التكامل - p للقارئ للتمرين). سنعوض من المعادلة (2-6-a) عن $g_C(E)$ ومن المعادلة (2-7) عن $f(E)$ في المعادلة (2-8-a).

فنحصل على:

$$n = \frac{m_n^* \sqrt{2 m_n^*}}{\pi^2 \hbar^3} \int_{E_C}^{E_{Top}} \frac{\sqrt{E - E_C}\ dE}{1 + e^{(E-E_F)/kT}} \qquad (2\text{-}9)$$

$$\eta = \frac{(E-E_C)}{kT} \qquad (2\text{-}10\text{-}a)$$

$$\eta_C = \frac{(E_F-E_C)}{kT} \qquad (2\text{-}10\text{-}b)$$

$$E_{Top} \rightarrow \infty \qquad (2\text{-}10\text{-}c)$$

وبالتالى نحصل على :

$$n = \frac{m_n^* \sqrt{2 m_n^*}\ (kT)^{\frac{3}{2}}}{\pi^2 \hbar^3} \int_0^\infty \frac{\eta^{\frac{1}{2}}\ d\eta}{1 + e^{(\eta-\eta_C)/kT}} \qquad (2\text{-}11)$$

التبسيط لحد التكامل العلوى من المعادلة (2-10-c) لا يغير فى النتيجة؛ لأننا نعلم أن الدالة تحت التكامل ستئول للصفر بعد مضاعفات قليلة من kT.

وبالتالى فإن من المؤكد أن تغيير حد التكامل العلوى إلى ما لا نهاية لن يؤثر فى قيمة التكامل. [جرب أن تكامل e^{-x} من صفر إلى 100 ثم من صفر إلى ما لا نهاية لتتأكد مما نقول]. بالمثل فى التكامل p يمكن أن نعوض $E_{Bottom} \rightarrow -\infty$ دون تغيير فى قيمة التكامل.

ما زال إجراء التكامل (2-11) مستعصيا ولا توجد له صورة منتهية closed form حتى بعد التبسيط (2-10-c). التكامل نفسه سنجده فى الواقع فى مراجع الجداول الرياضية (أو يحسب عدديا بالحاسب). إذا عرفنا :

$$F_{\frac{1}{2}}(\eta_C) \equiv \int_0^{\infty} \frac{\eta^{\frac{1}{2}}\, d\eta}{1 + e^{\eta-\eta_C}}$$ تكامل فرمى - ديراك من الرتبة 1/2 (2-12)

$$N_C \equiv 2\left[\frac{m_n^* (kT)}{2\pi\, \hbar^2}\right]^{\frac{3}{2}}$$ الكثافة «الفعالة» لحالات نطاق التوصيل (2-13-a)

$$N_V \equiv 2\left[\frac{m_p^* (kT)}{2\pi\, \hbar^2}\right]^{\frac{3}{2}}$$ الكثافة «الفعالة» لحالات نطاق التكافؤ (2-13-b)

نحصل على :

$$n = N_C \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{\frac{1}{2}}(\eta_C)$$ (2-14-a)

وبالمثل :

$$p = N_V \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{\frac{1}{2}}(\eta_C)$$ (2-14-b)

حيث :

$$\eta_V \equiv (E_V - E_F)/kT$$

المعادلات (2-14) هى نتائج عامة جدا وصالحة لأى موضع نتصوره لمستوى فرمى E_F. الثابتان N_C و N_V يمكن حسابهما من :

$$N_{C;V} = \left(2.510 \times 10^{19} / cm^3\right)\left(\frac{m_{n,p}^*}{m_o}\right)^{\frac{3}{2}}$$ عند $T = 300$ K

ويمكن الحصول على قيم تكاملات فرمى من الجداول أو المنحنيات أو بالحساب العددى باستخدام الحاسب. لكن هذه العلاقة ذات الصيغة العامة تبقى مركبة وغير مناسبة للاستخدام فى التحليلات الروتينية. من حسن الحظ توجد صيغ نهائية مبسطة تغطى السواد الأعظم من المسائل اليومية. لكى نكون محددين، إذا وضعنا هذا القيد على مستوى فرمى: $E_F \leq E_C - 3kT$ فإن الدالة $1/[1+\exp(\eta-\eta_C)]$ تئول إلى $\exp[-(\eta-\eta_C)]$ لكل قيم $E \leq E_C$ (أى لكل $\eta>0$)، وبالتالى :

$$F_{\frac{1}{2}}(\eta_C) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} e^{(E_F - E_C)/kT} \qquad (2\text{-}15\text{-}a)$$

وبالتالى إذا كان $E_V + 3kT < E_F < E_C - 3kT$ فإن :

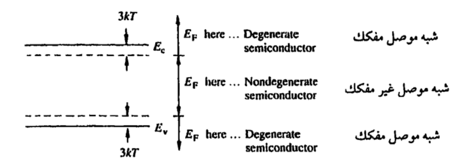
$$F_{\frac{1}{2}}(\eta_V) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} e^{(E_V - E_F)/kT} \qquad (2\text{-}15\text{-}b)$$

وينتج عن ذلك أنه إذا كان $E_V + 3kT < E_F < E_C - 3kT$ إذن :

$$n = N_C\, e^{(E_F - E_C)/kT} \qquad (2\text{-}16\text{-}a)$$

$$p = N_V\, e^{(E_V - E_F)/kT} \qquad (2\text{-}16\text{-}b)$$

التبسيط الرياضى المؤدى للمعادلتين (2-16) مكافئ لتقريب معاملى الإشغال $f(E)$، و$1-f(E)$ بدوال قوى بسيطة، وهو تقريب رأينا سابقا أنه يتحقق بشرط أن يكون E_F داخل فجوة النطاق ويبعد عن الحافتين E_V ، E_C بطاقة لا تقل عن $3kT$ بدلا من إعادة كتابة الشرط $E_V + 3kT \leq E_f \leq E_C - 3kT$ فى كل مرة فإننا ببساطة نلقب شبه الموصل الذى يحقق هذا الشرط بشبه الموصل غير المفكك nondegenerate (من يريد معرفة أصل هذه التسمية عليه بالرجوع إلى كتاب فى ميكانيكا الكم). أما إذا اقترب E_F من إحدى الحافتين بأقل من $3kT$، أو دخل إلى أحد النطاقين فإن شبه الموصل المعنى يسمى بالمفكك degenerate (التفكك فى ميكانيكا الكم يعنى وجود أكثر من حالة كمية لها نفس قيمة الطاقة). هذان المصطلحان الهامان موضحان تصويريا فى الشكل (٢-١٩).



شكل (٢-١٩) تعريف أشباه الموصلات المفككة وغير المفككة

٢-٥-٢ تعبيرات بديلة لقيم n , p (Alternative Expressions for n and p)

بالرغم من أن الصيغة المعطاة بالمعادلة (2-16) تعتبر منتهية، إلا أنها ليست فى أبسط صورة ممكنة. وغالبا ما نستعمل بدلا منها صورة أبسط.

يمكن الحصول على الصيغة البديلة إذا ما تذكرنا أن E_i - مستوى فرمى لشبه الموصل الذاتى - يقع قريبا من منتصف فجوة النطاق وأن المعادلة (2-16) مؤكد أنها تنطبق على شبه الموصل الذاتى أى أن $n = p = n_i$، وكذلك $E_F = E_i$، وبالتالى :

$$n_i = N_C \; e^{(E_i - E_C)/kT} \tag{2-17-a}$$

$$p_i = N_V \; e^{(E_V - E_i)/kT} \tag{2-17-b}$$

ينقل N_C، N_V إلى الطرف الأيسر من المعادلة (2-17).

نحصل على :

$$N_C = n_i \; e^{(E_C - E_i)/kT} \tag{2-18-a}$$

$$N_V = n_i \; e^{(E_i - E_V)/kT} \tag{2-18-b}$$

التعويض من المعادلة (18) فى المعادلة (16) يعطى :

$$n = n_i \; e^{(E_F - E_i)/kT} \tag{2-19-a}$$

$$p = n_i \; e^{(E_i - E_F)/kT} \tag{2-19-b}$$

المعادلة (2-19) ومثيلتها المعادلة (2-16) صحيحتان لأى شبه موصل غير مفكك وتحت ظروف الاتزان. اختصرت الثوابت فى المعادلة (2-16) من ثابتين (N_V, N_C) لثابت واحد فى المعادلة (2-19) : (n_i)، ومستويات الطاقة من ثلاث فى المعادلة (2-16) إلى اثنين فقط فى المعادلة (2-19). وبسبب طبيعتهما المتماثلة نجد أن استدعاء زوج المعادلات (2-19) البديلة من الذاكرة أسهل؛ لأنها تتطلب فقط تبديل E_F مع E_i عندما نذهب من المعادلة -n إلى المعادلة -p.

٢-٥-٣ n_i وحاصل ضرب np (n_i and the np Product)

من المعادلة (2-19) يمكن استنتاج أن التركيز الذاتى للحاملات n_i يتجلى بشكل لافت فى حسابات تركيزات الحاملات. ويقودنا الاستمرار فى تأسيس علاقات متعلقة بتركيزات الحاملات إلى اعتبارات تختص بالذات بالتركيز الذاتى n_i .

أولا : إذا أجرينا عملية ضرب على طرفى المعادلتين (2-17-a) و(2-17-b) نحصل على:

$$n_i^2 = N_C N_V \; e^{-(E_C - E_V)/kT} = N_C N_V \; e^{-E_G/2kT} \tag{2-20}$$

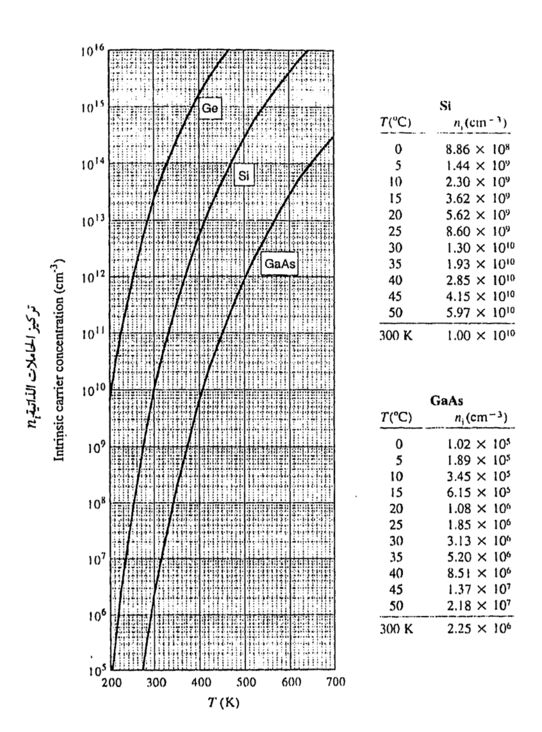
أى أن :

$$\boxed{n_i = \sqrt{N_C N_V} \; e^{-E_G/2kT}} \tag{2-21}$$

تعبر المعادلة (2-21) عن n_i كدالة فى كميات معروفة، وبالتالى يمكن استخدامها لحساب n_i كدالة فى درجة الحرارة. أوردنا من قبل قيما عددية للتركيزات الذاتية للحاملات فى السيليكون والجرمانيوم عند درجة حرارة الغرفة، يعرض الشكل (٢-٢٠) أفضل المنحنيات المتاحة لتغيير n_i مع درجة الحرارة فى السيليكون، الجرمانيوم، وزرنخيد الجاليوم.

علاقة ثانية غاية فى الأهمية خاصة بالتركيز n_i تجىء من ضرب طرفى المعادلتين (2-19-a)، (2-19-b)، أى :

$$\boxed{np = n_i^2} \tag{2-22}$$



Si

T(°C)	n_i(cm^{-3})
0	8.86×10^{8}
5	1.44×10^{9}
10	2.30×10^{9}
15	3.62×10^{9}
20	5.62×10^{9}
25	8.60×10^{9}
30	1.30×10^{10}
35	1.93×10^{10}
40	2.85×10^{10}
45	4.15×10^{10}
50	5.97×10^{10}
300 K	1.00×10^{10}

GaAs

T(°C)	n_i(cm^{-3})
0	1.02×10^{5}
5	1.89×10^{5}
10	3.45×10^{5}
15	6.15×10^{5}
20	1.08×10^{6}
25	1.85×10^{6}
30	3.13×10^{6}
35	5.20×10^{6}
40	8.51×10^{6}
45	1.37×10^{7}
50	2.18×10^{7}
300 K	2.25×10^{6}

شكل (٢-٢٠) تركيز الحاملات الذاتية n_i فى Ge ، Si ، و $GaAs$ كدالة فى درجة الحرارة

بالرغم من أن العلاقة (2-22) تبدو بسيطة لكنها غالبا ما تثبت أنها مفيدة جدا فى الحسابات العملية إذا عرفنا أحد التركيزين n أو p فيمكن من (2-22) حساب الآخر بشرط أن شبه الموصل فى ظروف الاتزان وغير مفكك.

تعيين n_i بدقة :

بالتعـويض من تعاريف N_C و N_V (معادلة (2-13)) فى المعادلة (2-21) وبعد التعويض عن الثوابت بقيمها العددية يحصل المرء على :

$$n_i = \left(2.510 \times 10^9 \right) \left(\frac{m_n^* \; m_p^*}{m_o^*} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{T}{300} \right)^{\frac{2}{3}} \quad e^{-E_G/kT}$$

فى الحقيقة m_n^* ، m_p^* ، و E_g كلها تعتمد على درجة الحرارة، ولهذا يجب أخذ هذه التغـيرات فى الحـسبان. وقـد وجد سيـرول وجرين [(١)] :أنه فى السيليكون وعند درجة حرارة الغرفة، $T = 300$ K، تكون: $n_i = (1.00 \pm 0.03) \times 10^{10} / cm^3$.

٢-٥-٤ علاقة تعادل الشحنة Charge Neutrality Relationship

تخلو العلاقات التى أسـسناها إلى الآن من أى ذكر صريح لتركيزات المـشيبات. وتربط بصفة عامة بين تركيزات الحاملات وتركيزات المشيبات علاقة تعادل الشحنات.

لكى نؤسس لعلاقة تعـادل الشحنات سنعتبر أن شبـه الموصل مشاب بانتظام، أى أن عدد الذرات المشيبة لكل cm^3 هو نفسه فى كل مكان. وإذا فحـصنا بطريقة منتظمة مناطق صغيرة داخل شبه الموصل (أى بعـيدة عن السطح) وبافتراض أن الظروف السائدة هى ظروف الاتزان فلا بد وأن نجد أن كل منطقة على حدة مـتعادلة الشحنة أى لا تحمل أى شحنة إجمالية. إذا لم تكن الحالة هكذا، فلا بد وأن ينشـأ مجال كهربى داخل شبه الموصل. وسيـسبب هذا المجـال سريانا للحامـلات أى تيارا مما يتناقض وتعـريف حالة الاتزان التى يفترض وجودها. لكن توجد بالفعل كـيانات مشحونة داخل شبه الموصل: الإلكتـرونات، والشغـرات، والواهبات المتـأينة (التى تصبح مـوجبـة الشحنة بعـد منح إلكترونها الخامس) وأخـيرا المتقبلات المتأينة والمشحونة بشـحنة سالبة. كل هذه الكيانات تتعايش مـعا جنبا إلى جنب داخل شبه الموصل. فى المادة المشـابة بانتظام يتطلب تعادل الشحنة فى كل مكان، أى أن الشحنة لكل cm^3 تساوى صفرا. ويعنى ذلك أن :

$$qp \; - \; qn \; + \; qN_D^+ \; - \; qN_A^- \; = \; 0 \qquad (2\text{-}23)$$

أى أن :

$$\boxed{p \; - \; n \; + \; N_D^+ \; - \; N_A^- \; = \; 0} \qquad (2\text{-}24)$$

(١) جورنال الفيزياء التطبيقية مجلد 70 صفحة 846 يوليه 1991].

حيث تمثل .

N_D^+ عدد المانحات المتأينة الموجبة السالبة الشحنة لكل cm^3.

N_A^- عدد المتقبلات المتأينة السالبة الشحنة لكل cm^3.

وكما نوقش من قبل فإنه عند درجة حرارة الغرفة توجد طاقة حرارية كافيا لكى تؤين كل مواقع المانحات والمتقبلات ذات مستويات الطاقة الضحلة (أى القريبة من E_C و E_V).

ونعرف هنا :

N_D هو العدد الكلى للمانحات لكل cm^3.

N_A هو العدد الكلى للمتقبلات لكل cm^3.

فإذا جعلنا :

$$N_D^+ = N_D \qquad N_A^- = N_A$$

درجة حرارة الغرفة
تأين كلى

فإننا نحصل على :

$$p - n + N_D - N_A = 0 \qquad \text{تأين كلى} \qquad (2\text{-}25)$$

المعادلة (2-25) هى الشكل القياسى لعلاقة تعادل الشحنة.

٢-٥-٥ حسابات تركيزات الحاملات Carrier Concentration Calculation

أخيرا وصلنا لموضع يمكننا من حساب تركيزات الحاملات فى أشباه الموصلات المنتظمة الإشابة تحت ظروف الاتزان، فى هذه الحسابات نفترض بالتحديد أن شبه الموصل غير مفكك (لكى نستخدم العلاقة $np = n_i^2$)، وأن كل ذرات الإشابة تامة التأين. يجب أن تعتبر أن قيمة n_i معروفة (سواء من منحنى أو جدول أو كنتيجة محسوبة مسبقا). وفى جميع الأحوال سنفترض أنها معطاة. وكذلك N_A، N_D الموجودتان فى علاقة معادلة الشحنة، يمكن التحكم فيهما وتحديدهما تجريبيا ويجب أن نعتبرهما معروفين مسبقا. الكميتان المتبقيتان هما n، p. وتحت الشروط المذكورة أعلاه (الاتزان وعدم التفكك والتأين التام للذرات المشيبة) نستطيع تحديد n، p من معادلتى: تعادل الشحنة وعلاقة $np = n_i^2$.

ونبدأ بهذه العلاقة الأخيرة ونكتب :

$$p = \frac{n_i^2}{n} \qquad (2\text{-}26)$$

حذف p من المعادلتين (2-25) و (2-26) يعطى :

$$\frac{n_i^2}{n} - n + N_D - N_A = 0 \qquad (2\text{-}27)$$

أو

$$n^2 - n\,(N_D - N_A) - n^2 = 0 \qquad (2\text{-}28)$$

ويؤدى حل معادلة الدرجة الثانية فى n إلى :

$$n = \frac{N_D - N_A}{2} + \left[\left(\frac{N_D - N_A}{2}\right)^2 + n_i^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (2\text{-}29\text{-}a)$$

وأيضا :

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{N_A - N_D}{2} + \left[\left(\frac{N_A - N_D}{2}\right)^2 + n_i^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (2\text{-}29\text{-}b)$$

طبعا احتفظنا فقط بالإشارة الموجبة فى المعادلات (2-29)؛ لأن الإشارة السالبة (فى قانون معادلة الدرجة الثانية) ستعطى تركيزا سالبا وهى نتيجة غير مقبولة.

حلول المعادلتين (2-29) هى حلول الحالة العامة.

فى أغلب الحسابات العملية يمكن تبسيط هاتين المعادلتين قبل التعويض بالأرقام عن قيم N_D، N_A، n_i. الحالات الخاصة ذات الاهتمام المحدد هى :

١- شبه موصل ذاتى $N_A = 0$، $N_D = 0$، فإن $n = p = n_i$ كما هو متوقع.

٢- شبه موصل مشاب: $N_D >> N_A, N_D >> n_i$ (أو $N_A >> N_D, N_A >> n_i$).
وهذه حالة مهمة عمليا.

الشوائب العارضة (أى التى لم توضع عن قصد) قليلة للغاية بحيث تؤدى الإضافة الروتينية المحكومة للمشيبات إلى أن $N_D >> N_A$ (أو $N_A >> N_D$). بالإضافة إلى ذلك فإن n_i فى السيليكون عند درجة حرارة الغرفة حوالى $10^{10}/\text{cm}^3$، بينما أى إشابة متعمدة تجعل N_D (أو N_A) لا تقل عن $10^{14}/\text{cm}^3$، وهذه الحالة هى الغالبة عمليا.

إذا كان $N_D - N_A \approx N_D >> n_i$، فإن الجذر التربيعى فى المعادلة (2-29-a) يختزل إلى $N_D/2$، وبالتالى :

$n \approx N_D$	$N_D >> N_A\ ,\ N_D >> n_i$	(2-30-a)
$p \approx n_i^2 / N_D$	عدم تفكك تأين تام	(2-30-b)

$p \approx N_A$	$N_A >> N_D\ ,\ N_A >> n_i$	(2-31-a)
$n \approx n_i^2 / N_A$	عدم تفكك تأين تام	(2-32-b)

وكمثال عددى نفترض أن عينة سيليكون فى درجة حرارة الغرفة قد أشيبت بتركيز $N_D = 10^{15} / cm^3$. يمكن بسرعة من المعادلة (30) معرفة أن :

$$n \approx 10^{15} /cm^3 \quad , \quad p \approx 10^5 / cm^3$$

٣- شبه موصل مشاب حيث $n_i >> |N_D - N_A|$ ، الزيادة المطردة لدرجة الحرارة المحيطة بشبه الموصل تسبب زيادة فى التركيز الذاتى n_i (انظر الشكل ٢-٢٠). عند درجة الحرارة الكافية الارتفاع فإن n_i فى النهاية ستتعدى تركيز المشيبات. إذا كان $n_i >> |N_D - N_A|$ فإن الجذر التربيعى فى المعادلة (2-29) سيئول إلى n_i، وبالتالى $n \approx p \approx n_i$. بكلمات أخرى: تصبح جميع أشباه الموصلات أشباه موصلات ذاتية عندما تتعدى درجة الحرارة لقيمة كافية بحيث تكون عندها : $n_i >> |N_D - N_A|$.

٤- فى أشباه الموصلات المعوضة كما هو واضح من المعادلة (2-29)، كلا من n و p تميلان لتحييد عمل الأخرى. وفى الواقع يمكن إنتاج شبه موصل شبيه بالذاتى إذا جعلنا $N_D - N_A = 0$.

فى بعض المواد مثل Ga As نجد أن N_A قد تكون مقاربة لقيمة N_D لبعض البلّورات. عندما تتقارب قيم N_A، N_D (والتى لا تساوى صفرا) فإن المادة يقال لها معوضة compensated. وفى هذه الحالة لا يجوز التبسيط ويجب التعويض بقيم N_A و N_D كما هى.

مثال ٢-٤ :

عينة سيليكون مشابة بتركيز 10^{14} ذرة بورون لكل cm^3.

أ - ما هى تركيزات الحاملات عند $T = 300$ K.

ب- ما هى تركيزات الحاملات عند $T = 470$ K.

الحل :

أ - البورون يقوم بدور المتقبلة فى السيليكون (انظر الجدول ٢-٢) إذن :

$N_A = 10^{14}$ / cm^3 عند $T = 300$ K، و $n_i = 1.00 \times 10^{10}$ / cm^3 ، وبالتالى $N_A >> n_i$، وبما أن رأس السؤال لم يذكر أى إشابة أخرى. نستنتج أن $N_A >> N_D$، إذن من المعادلة (2-31) نحسب تركيزات الحاملات $p = N_A = 10^{14}$/cm^3، $n = n_i^2 / N_A = 10^6$/cm^3.

ب- نستخرج من الشكل (٢-٢٠) القيمة $n_i = 10^{14}$ / cm^3 عند T = 470 K.
بما أن n_i مقاربة فى القيمة لـ N_A إذن نستخدم المعادلة (2-29) دون تبسيط، أى :

$$p = \frac{N_A}{2} + \left[\left(\frac{N_A}{2} \right)^2 + n_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1.62 \times 10^{14} / \text{cm}^3$$

$$n = \frac{n_i^2}{n} = 6.18 \times 10^{13} / \text{cm}^3$$

٢-٥-٦ تحديد E_F (Determination of E_F)

تحديد مستوى فرمى على مخطط نطاق الطاقة غالبا ما يكون مثار اهتمام، مثلا عندما ناقشنا شبه الموصل الذاتى أشرنا إلى أن موضع E_i هو فى مكان ما قرب منتصف فجوة النطاق. سيكون من المفيد معرفة موضع E_i فى فجوة النطاق بدقة. وأكثر من ذلك لقد طورنا صيغا لحساب n و p مناسبة لأشباه الموصلات غير المفككة. طبعا كون شبه موصل مفكك أو غير مفكك يعتمد على موضع E_F.

قبل الولوج لآليات إيجاد مستوى فرمى فى حالات مختارة، سيكون من المفيد أن نذكر ملاحظة عامة، ونقصد بذلك أن المعادلات (2-19) أو (2-16) [أو حتى المعادلات العامة (2-14)] تنشئ تناظرا واحدا لواحد بين طاقة فرمى وتركيزات الحاملات، بالتالى إذا حسبنا أى واحد من المتغيرات الثلاثة n، p، أو E_F فإننا دائما سنتمكن من تحديد المتغيرين الباقيين فى ظروف الاتزان.

١- التحديد الدقيق لموضع E_F فى المادة الذاتية :

$$n = p \tag{2-32}$$

بالتعويض عن n، p فى المعادلة السابقة من المعادلتين (2-16) بعد أن تضع $E_F = E_i$، تصل إلى :

$$N_C \; e^{(E_i - E_C)/kT} = N_V \; e^{(E_V - E_i)/kT} \tag{2-33}$$

ومنها تحصل على :

$$E_i = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \; ln \left(\frac{N_V}{N_C}\right) \tag{2-34}$$

لكن :

$$\frac{N_V}{N_C} = \left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right)^{\frac{3}{2}} \tag{2-35}$$

ونتيجة لذلك تصبح :

$$E_i = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3}{4} \; kT \; ln \left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right) \tag{2-36}$$

طبقا للمعادلة (2-36)، فإن E_i يقع بالضبط عند منتصف فجوة الطاقة إذا كانت $m_p^* = m_n^*$ أو عند $T = 0$ K . وفى الحالة العملية للسيليكون وعند درجة حرارة الغرفة، يعطى الجدول (٢-١) القيمة التالية m_p^*/m_n^*، وبالتالى فإن :

$$(\tfrac{3}{4}) \; kT \; ln \; (m_p^* / m_n^*) = - 0.0073 \text{ eV}$$

إذن E_i يقع تحت منتصف فجوة النطاق بحوالى 0.0073 eV .

وبرغم أن هذه الحقيقة قد تكون هامة فى بعض المسائل، لكن عادة ما يتم تجاهلها عند رسم مخططات نطاق الطاقة أو ما شابه ذلك .

٢- أشباه الموصلات المشابة (غير مفككة والمشيبات تامة التأين)

تمكننا المعادلتان (2-19) من التحديد العام لمستوى فرمى فى أشباه الموصلات المشابة بالمانحات أو المتقبلات بفرض أنها غير مفككة وتحت الاتزان، وعند درجة الحرارة التى عندها كل المشيبات متأينة . بالتحديد عند حل المعادلتين (2-19) للحصول على $E_F - E_i$ نصل إلى :

$$E_F - E_i = kT \ ln \left(\frac{n}{n_i}\right) = -kT \ ln \left(\frac{p}{n_i}\right) \qquad (2-37)$$

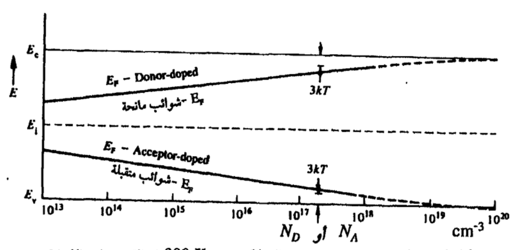
بالتعويض عن قيم n أو p فى المعادلة (2-37) يمكن الحصول على موضع E_F. ويمكن الحصول على n أو p من المعادلة المناسـبة سواء (2-29)، (2-30)، أو (2-31). فمثلا من المعادلة (2-30-a) و (2-31-a) نجد أن $n \approx N_D$ فى حالة شبه الموصل المشاب بالمانحات وأن $p \approx N_D$ فى حالة شبه الموصل المشاب بالمتقبلات، وذلك عند درجة حرارة الغرفة.

بالتعويض بهذه القيم فى المعادلة (2-37) نحصل على :

$$E_F - E_i = kT \ ln \left(\frac{N_D}{n_i}\right) \quad ... N_D >> N_A, N_D >> n_i \qquad (2-38-a)$$

$$E_i - E_F = kT \ ln \left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad ... N_A >> N_D, N_A >> n_i \qquad (2-38-b)$$

يتضح من المعادلتين (2-38) أن مستوى فـرمى يتحرك بانتظام إلى أعلى فوق E_i مع زيادة تركيز المشـيبات المانحة ويتحـرك بانتظام إلى أسفل تحت E_i مع زيادة المشيبات المتقبلة. يـبين الشكل (٢-٢١) موضع مستوى فـرمى بدقة للسيليكون كـدالة فى تركيز الإشابة عند درجة حرارة الغـرفة، ويدعم هذا الشكل جيدا ما سبق وأشـرنا إليه بالعبارة



شكل (٢-٢١) موضع مستوى فرمى فى السيليكون عند $300\ K$ كدالة فى تركيز الإشابة
الخطان المصمتان رسما طبقا للمعادلة (2-28-a) للمادة المشابة بمانحات
وللمعادلة (2-28-b) للمادة المشابة بمتقبلات (هنا $kT=0.0259\ eV$ و $n_i = 10^{10}/cm^3$)
الجزء المتقطع يخص شبه موصل مفكك، وبالتالى لا يخضع للمعادلتين السابقتين

السابقة. لاحظ أيضا أنه عند أى درجة حرارة معـينة ولأى مادة شبه موصلة معطاة هناك حـد أقصى لتـركيـزات المانحات أو المتـقبـلات والذى بعـده تصبح المادة مـفككة. فى السيليكون عند درجة حرارة الغرفة تكون التركيزات غير المفككة القصوى هى.

$N_D \approx 1.6 \times 10^{18}/cm^3$، و $N_A \approx 9.1 \times 10^{17}/cm^3$. وجدير بالذكر أن تركيزات الإشابة الكبـيرة بالسيليكون والمطلوبة لإحـداث التفكك قد جـعلت كلا من المصطلحين «الإشابة العالية» (أو مادة n^+ أو p^+) أو «متفككة» (كوصف لمادة شبه الموصل) متكافئتين ويستخدم أى منهما مكان الآخر.

وأخيرا قد ينشأ سؤال عما هى الطريقـة التى يجب استخدامها لحساب E_F عندما لا يكون المرء متأكدا من كنه المادة مفككة أم غير مفككة؟

ما لم نكن متأكـدين من أن المادة مفككة سنفترض دائما أنها غـير مفككة ونطبق علاقـات عدم التفكك المناسبـة. فإذا اتضح أن E_F واقعة فى المنطقة المفككة (أى داخل أحد النطاقين أو قريبة من حد النطاق بأقل من $3kT$) وجب إعادة حساب E_F باستخدام طرق معقدة، خاصة بالمواد المفككة.

مثال ٢-٥ :

لكل من الحالات المعينة بالمثال ٢-٤ قم بتحديد موضع E_F، ثم احسب $E_F - E_i$ وارسم بعناية مخطط نطاق طاقة بالأبعاد الصحيحة لعينة السيليكون.

لاحظ أن للسـيليكون $E_G = 1.08$ eV، و $m_p^* / m_n^* = 0.71$، وذلك عند درجة الحرارة $T = 470$ K.

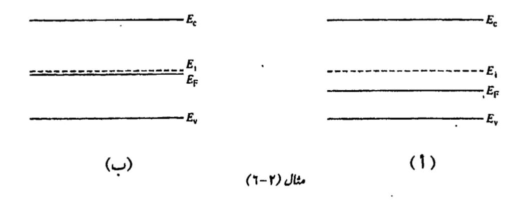
الحل :

فى الجزء (أ) بالمثال (٢-٤) $N_A = 10^{14} / cm^3$ لعينة سـيليكون عند 300 K. باستخدام المعادلة (2-26) يتضح أن E_i يقع تحت منتصف الفـجوة بمقدار 0.0073 eV (سبق أن ذكرنا ذلك أيضـا عقب المعادلة (2-36)، ثم نطبق المعادلة (2-38b) ونحصل على :

$$E_i - E_F = kT \ ln \ (N_A / n_i)$$

$$= 0.0259 \ ln \ (10^{14} / 10^{10}) = 0.239 \text{ eV}$$

مخطط نطاق الطاقة الذى يوضح موضع E_F مرسوم بالجزء (أ) بالشكل الآتى:



مثال (٢-٦)

ب- فى الجزء (ب) بالمثال (٢-٤) تم تسخين عينة لسيليكون إلى 470 K، وباستخدام $m_p^*/m_n^* = 0.71$ و $kT = 0.0405$ eV عند تسخين $T = 470$ K، أى (3/4) $kT\,ln\,(m_p^*/m_n^*) = -0.0104$ eV، نستنتج أن E_i تقع عند 0.0104 eV تحت منتصف فجوة النطاق. بما أن التركيز N_A مقارب للتركيز الذاتى n_i عند 470 K فيجب استخدام المعادلة (2-37) لتحديد E_F. وبالتحديد فإن $n_i = 10^{14}$ / cm³، وكذلك $p = 1.62 \times 10^{14}$/cm³.

$$E_i - E_F = kT\ ln\ (p/n_i)$$

$$= 0.04505\ ln\,(1.62\times 10^{14}/10^{14})$$

$$= 0.0195\ \text{eV}$$

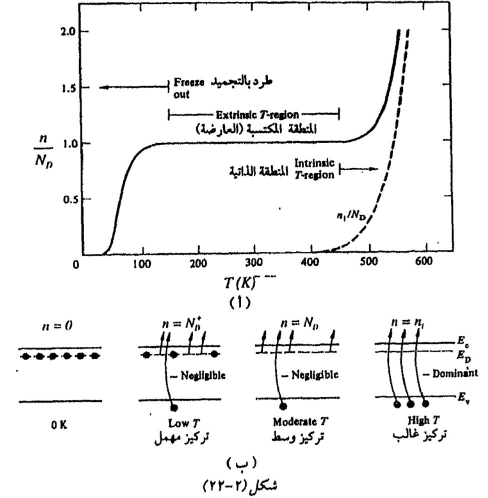
هنا E_F تزاح قليلا عن E_i كما هو مبين بالجزء (ب).

٢-٥-٧ تغير تركيز الحاملات مع درجة الحرارة

Change of Carrier Concentration with Temperature

قدمنا فى أجزاء متفرقة من هذا الفصل حقائق منفصلة عن اعتماد تركيزات الحاملات على درجة الحرارة. على سبيل المثال عند مناقشة فعاليات المشيبات فى الفقرة (٢-٣) ذكرنا أن المشيبات تتأين عند ارتفاع درجة الحرارة من $T = 0$ K إلى درجة حرارة الغرفة. وفى فقرات لاحقة كان هناك شكل يحوى منحنى التركيز الذاتى مع درجة الحرارة (الشكل ٢-٢٠) وحسابات تشير إلى أن كل أشباه الموصلات تصبح ذاتية $(p \rightarrow n_i\,,\, n \rightarrow n_i)$ عند درجات حرارة عالية كافية. فى الفقرة الفرعية الحالية التى نختم بها مناقشة تركيزات الحاملات، ستجمع وترتب الحقائق المتعلقة بدرجة الحرارة لتعطى وصفا أرحب، وأكثر اكتمالا عن كيفية تغير تركيزات الحاملات مع درجة الحرارة.

يبين الشكل (٢-٢٢ أ) منحنا نمطيا لتـركيز الحاملات مع درجة الحـرارة بافتراض عينة سـيليكون مشابه بفسـفور $N_D = 10^{15}/\ cm^3$. ويوضح الشكل بدقة الملامح العامة لتغـير تركيزات الحـاملات مع درجة الحرارة. بفـحص شكل (٢-٢٢ أ) نجد أن n تبقى تقريبا ثابتة عند القيمة N_D على مدى حرارى واسع يمتد من 150 K وحتى 450 K لعينة السيليكون المعطاة. المنطقة التى عندها $n \approx N_D$ وتسمى «بمنطقة درجة الحـرارة المكتسبة» extrinsic temperature region تشكل منطقة العمل لمعظم نبائط الحالة الجامدة. تحت درجة حرارة 100 K تقريبا تقع منطقة الطرد بالتجميد freeze- out، والتى عندها تهبط قيمة n كثيرا تحت N_D عندما $T \rightarrow 0\ K$. وفى الناحية المقابلة من تدريج درجة الحرارة تقع منطقة الحرارة الذاتية Intrinsic tempertaure region ($T > 450\ K$ للسيليكون)، حيث تزداد n فوق القيمة N_D ولتتقارب مع n_i كلما زادت درجة الحرارة.



(ب)

شكل (٢-٢٢)

أ - اعتماد نمطى على درجة الحرارة لتركيز الحاملات الأغلبية فى شبه موصل مشاب، أنشئ المنحنى بافتراض إشابة بالفسفور $N_D=10^{15}/cm^3$، لعينة Si.

أضيف المنحنى المتقطع الذى يمثل اعتماد n_i/N_D مع درجة الحرارة لغرض المقارنة

ب- تفسير كيفى لاعتماد التركيز على درجة الحرارة المبين بالجزء (أ)

لكى نفسر كيفيا التغير فى تركيز الحاملات مع درجة الحرارة، والذى وصفناه لتونًا، من المهم أن نتذكر أن تركيز الحاملات عند الاتزان داخل المادة يخضع لآليتين منفصلتين. فكل من الإلكترونات الممنوحة من الذرات المانحة لنطاق التوصيل مع إلكترونات التكافؤ المستثارة عبر فجوة النطاق إلى نطاق التوصيل (أى روابط سيليكون-سيليكون مكسورة)، كلا النوعين يضيفان إلى تركيز الإلكترونات (الحاملات الأكثرية فى المادة المشابة بالمانحات). عندما تئول $T \to 0\,\mathrm{K}$ لا تتوفر طاقة حرارية kT كافية لإطلاق الإلكترونات الخامسة المربوطة بوهن لذراتها المانحة وطبعا ستكون هذه الطاقة الحرارية الضئيلة غير كافية على الإطلاق لاستثارة إلكترونات عبر فجوة النطاق. إذن تكون $n = 0$ عندما $T = 0$، كما هو مبين فى الناحية اليسرى من الشكل (٢-٢٢ب). الزيادة الطفيفة لدرجة الحرارة فوق الصفر المطلق ستؤدى إلى «كسر الجمود» أو لتحرير بعض الإلكترونات الخامسة المرتبطة بالمواضع المانحة. وستظل الاستثارة من نطاق لنطاق غير واردة بالمرة، وبالتالى ففى منطقة حرارة الطرد بالتجميد يكون عدد الإلكترونات المتاحة هو عدد المانحات المتأينة $n = N_D^+$. بالاستمرار فى رفع درجة حرارة النظام سنصل للمنطقة التى عندها فى الغالب تتحرر كل الإلكترونات الخامسة الواهنة الارتباط بمواضع المنح مما يجعل n تتقارب إلى N_D وندخل بذلك للمنطقة الحرارية المكتسبة. فى نهاية المطاف طبعا سيتساوى عمل الإلكترونات المستثارة عبر فجوة النطاق مع عدد الإلكترونات المشتقة من المانحة (انظر الناحية اليمنى للشكل ٢-٢٢ب) ثم يزيد عنه، وفى النهاية ستغرق الإلكترونات القادمة من المانحات فى طوفان الإلكترونات الناتجة عن تكسر المزيد من روابط السيليكون- سيليكون (أى المستثارة عبر E_G).

يجب أن نشير -كملاحظة عملية- أنه كلما كبرت فجوة النطاق زادت الطاقة المطلوبة لاستثارة الإلكترونات من نطاق التكافؤ لنطاق التوصيل، وبالتالى ترتفع قيمة درجة الحرارة التى تبدأ عندها المنطقة الذاتية الحرارية. وبما أن درجة حرارة بدء المنطقة الذاتية تناظر الحد الأقصى للمدى الحرارى للتشغيل العادى لمعظم نبائط الحالة الجامدة، بالتالى فإن النبائط المبنية على Ga As سيمكنها العمل عند درجات حرارة قصوى أعلى من نظيراتها المبنية على السيليكون والمشابة بنفس مستوى الإشابة، وهذه الأخيرة ستعمل عند درجات حرارة قصوى أعلى من نظيراتها المبنية على الجرمانيوم والمتساوية معها فى الإشابة، فمثلا إذا افترضنا أن التركيز الحرج للإشابة هو $N_D = 10^{15}\,/\,\mathrm{cm}^3$، وأن بداية المنطقة الذاتية الحرارية ستكون تقريبا عند درجة الحرارة التى عندها $n_i = N_D$، سنستنتج إذن من الشكل (٢-٢٠) أن درجات الحرارة القصوى هى 385 K، 450 K و 700 K للجرمانيوم، والسيليكون وزرنخيد الجاليوم على الترتيب. وبالفعل فإن نبائط Ga As، وكذلك SiC (كربيد السيليكون له $E_G > 2\,\mathrm{eV}$) يستمر تطويرها للاستخدام فى البيئات المرتفعة الحرارة.

(٢-٦) ملخص وملاحظات ختامية

تحت العنوان العام «نمذجة الحاملات» قمنا بوصف، فحص، وتشخيص characterization الحاملات داخل شبه الموصل تحت ظروف «الثبات» أو الاتزان. اشتملت الموضوعات الهامة التى تعرضنا لها فى هذا الفصل على تقديم نموذجين «تصوير»: نموذج الروابط ونموذج نطاق الطاقة. فى الواقع أن نموذج نطاق الطاقة ليس مجرد نموذج (إنها لغة إشارة متطورة توفر وسائل مختصرة للتواصل على المستوى غير اللفظى) بالنسبة للحاملات ذاتها سيكون القارئ الآن قد تمّ دفعه بنجاح نحو التفكير بالإلكترونات والشغرات «كجسيمات» كلاسيكية شبيهة بالكرات. وحيث شحنة الإلكترون هى $-q$، والشغرة $+q$، والكتلة الفعالة للإلكترون هى m_n^*، وللشغرة m_p^*، على الترتيب. ويجب على القارئ أن يعرف أن أعداد الحاملات لنفس المادة الذاتية كلها متساوية وصغيرة نسبيا، لكن يمكن زيادة تركيز الحاملات اختياريا عن طريق إضافة ذرات شوائب خاصة (تسمى بالمشيبات) إلى شبه الموصل.

خلال معالجة مسألة تحديد تركيزات الحاملات فى أشباه الموصلات المشابة، طورنا أو اشتققنا عددا من العلاقات الرياضية المفيدة. وتمتد قائمة الموضوعات التى تستحق اهتماما خاصا لتشمل دوال كثافة الحالات (معادلتى 2-6)، دالة فرمى (معادلة 2-17)، العلاقات المتماثلة غير المفككة لكل من n و p (معادلتى 2-19)، حاصل ضرب np (معادلة 2-22)، علاقة تعادل الشحنة (معادلة 2-25)، وأخيرا التغييرات المبسطة لكل من n و p، والتى تخص أشباه الموصلات النمطية عند درجة حرارة الغرفة (معادلتى (2-30) و (2-31).

جمعنا المعادلات السابقة الذكر مع بعض المعادلات الأخرى ووضعناها فى الجدول (٢-٤). يجب أن يحذر القارئ من استخدام هذه المعادلات بدون تفكير وفهم؛ لأن مسائل أشباه الموصلات مفعمة بالاستثناءات، والحالات الخاصة والأوضاع غير المثالية، وأنه من الضرورى على من يستخدم هذه العلاقات أن يعى الفرضيات التى استخدمت فى اشتقاق هذه العلاقات وحدود صحتها فى أى وكل التعبيرات المستعملة فى التحليل والحسابات. بالإضافة لعلاقات الحاملات الكمية، على القارئ أن يطور «إحساسا» كيفيا بتوزيعات الحاملات فى النطاقين المعنيين، وبتغيير التركيز الذاتى مع درجة الحرارة، والتغير النمطى لتركيز الحاملات الأغلبية فى شبه الموصل المشاب مع تغير درجة الحرارة.

أخيرا، يجب أن نولى عناية خاصة بالمصطلحات الفنية الكثيرة والقيم الوسيطة parametric التى قدمت فى هذا الفصل. المصطلحات أمثال شبه موصل مكتسب،

جدول (٢-٤) ملخص معادلات نمذجة حاملات الشحنة الكهربية

Table 2.4 Carrier Modeling Equation Summary. علاقات تركيز الحاملات

Density of States and Fermi Function

$$g_c(E) = \frac{m_n^*\sqrt{2m_n^*(E - E_c)}}{\pi^2\hbar^3}, \quad E \geq E_c$$

$$g_v(E) = \frac{m_p^*\sqrt{2m_p^*(E_v - E)}}{\pi^2\hbar^3}, \quad E \leq E_v$$

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}}$$

Carrier Concentration Relationships

$$n = N_C \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}(\eta_c) \qquad N_C = 2\left[\frac{m_n^* kT}{2\pi\hbar^2}\right]^{3/2}$$

$$p = N_V \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}(\eta_v) \qquad N_V = 2\left[\frac{m_p^* kT}{2\pi\hbar^2}\right]^{3/2}$$

$$n = N_C e^{(E_F - E_c)/kT}$$

$$p = N_V e^{(E_v - E_F)/kT}$$

$$n = n_i e^{(E_F - E_i)/kT}$$

$$p = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$$

n_i وحاصل ضرب np وتعادل الشحنة

$$n_i = \sqrt{N_C N_V}\, e^{-E_G/2kT} \qquad np = n_i^2 \qquad p - n + N_D - N_A = 0$$

علاقات حسابية لكل من n و p ومستوى فرمى

$$n = \frac{N_D - N_A}{2} + \left[\left(\frac{N_D - N_A}{2}\right)^2 + n_i^2\right]^{1/2}$$

$$E_i = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} kT \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right)$$

$$n \simeq N_D, \quad p \simeq n_i^2/N_D \qquad N_D \gg N_A,\ N_D \gg n_i$$

$$E_F - E_i = kT\ln(n/n_i) = -kT\ln(p/n_i)$$

$$p \simeq N_A, \quad n \simeq n_i^2/N_A \qquad N_A \gg N_D,\ N_A \gg n_i$$

$$E_F - E_i = kT\ln(N_D/n_i) \quad N_D \gg N_A,\ N_D \gg n_i$$

$$E_i - E_F = kT\ln(N_A/n_i) \quad N_A \gg N_D,\ N_A \gg n_i$$

مانحة، متقبلة، شبه موصل غير مـفكك، مستوى فرمى وغيرها سيتم ذكرها مرارا عند مناقشـة النبائط شبه الموصلـة. بالمثل فإن معـرفة القيم النمطـية للوسـيطات الهامة مثـل $E_G = 1.12$ eV، $n_i = 10^{10}/\text{cm}^3$ للسيليكون عند $T = 300$ K ستكون مفـيدة، سواء أجرينا حسابات عابـرة أو حسابات دقيقة باستخدام الحـاسب. كما أن هذه القيم تصلح كمقياس لمعرفة المقدار النسبى للكميات الجديدة التى قد نقابلها وهل هى كبيرة أم صغيرة نسبيا.

أسئلة على الفصل الثانى :

١- باستخدام نموذج الروابط لأشباه الموصلات وضح كيفية تصوير:

أ - ذرة غائبة، ب- إلكترون، جـ- شغرة، د - مانحة، هـ- متقبلة.

٢- استخدم نموذج نطاق الطاقة لتصوير :

أ - إلكترون. ب- شغرة . جـ- موضع مانحة. د- موضع متقبلة.

هـ- الطرد بالتجميد للشغرات الأغلبية عند موضع متقبلة عندما $T \to 0$ K.

و- الطرد بالتجميد بالإلكترونات الأغلبية عند موضع مانحة عندما $T \to 0$ K.

ز - توزيع الحاملات مع الطاقة لكل نطاق على حدة (الإلكترونات فى نطاق التوصيل والشواغر فى نطاق التكافؤ).

ح - شبه موصل ذاتى. ط - شبه موصل من النوع n.

ي- شبه موصل من النوع p. ك- شبه موصل غير مفكك.

ل - شبه موصل مفكك.

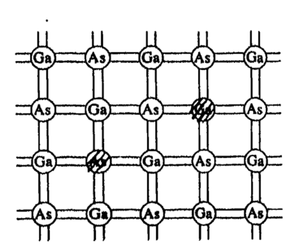
٣- نموذج الروابط لـ Ga As موضح فى الشكل (م ٢-٣).

أ - أعد رسم الشكل بعد إزالة الذرتين المظللتين (تلميح : إزالة ذرة Ga أو As يعنى أيضا إزالة إلكترونات الترابط الخاصة بالذرة المنزوعة).

ب- أعد رسم الشكل بعد استبدال الذرتين المظللتين بذرتى Si.

جـ- هل استبدال ذرات جاليوم بالسيليكون يؤدى إلى Ga As من النوع n أم p، اشرح.

د - هل استبدال ذرات زرنيخ بذرات سيليكون سيؤدى إلى Ga As من النوع n أم p. اشرح.



الشكل (م ٢-٣)

هـ- ارسم مخطط نطاق الطاقة لـ Ga As عند إشابته بالسيليكون :

١- فى مواضع الجاليوم.

٢- فى مواضع الزرنيخ.

٤- اشتق تعبير للعدد الكلى للحالات المتاحة لكل cm^3 فى نطاق التوصيل فى مدى الطاقة E_C حتى $E_C + \gamma kT$ حيث γ ثابت.

٥- أ- عند درجة الحرارة $T > 0$ K ما هو احتمال أن يحتل إلكترون حالة طاقتها E_F.

ب - إذا انطبق E_F على E_C ما احتمال إشغال الحالة $E = E_C + kT$.

جـ- إذا كان احتمال أن الحالة $E_C + kT$ مشغولة يساوى احتمال أنها غير مشغولة، أين موضع مستوى فرمى؟

٦- اثبت أن توزيع الإلكترونات فى نطاق التوصيل يكون أكبر ما يمكن عند الطاقة $E_C + kT/2$ بفرض أن شبه الموصل غير مفكك.

٧- ابدأ من المعادلة (2-8-b)، واثبت صحة المعادلتين : (2-14-b)، و(2-16-b)، اكتب خطوات الإثبات كلها.

٨- فى شبه موصل افتراضى، كثافة الحالات هى :

$$g_C(E) = \text{const} = N_C / kT \,, \; E \geq E_C$$

أ - إذا كان $E_F < E_C - 3\,kT$ ارسم توزيع الإلكترونات فى نطاق التوصيل.

ب- احسب تركيز الإلكترونات المناظر للمعادلتين (2-14-b)، و(2-16-a).

٩- أ- تحقق من صحة التعبيرين بالفقرة الفرعية (٢-٥-١) عند $T = 300$ K :

$$N_C = (2.510 \times 10^9 / \text{cm}^3)\,(m_n^* / m_o^*)^{3/2}$$

$$N_C = (2.510 \times 10^9 / \text{cm}^3)\,(m_n^* / m_o^*)^{3/2}$$

عوض بالقيم :

$$m_o = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ Coul}$$

$$h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ J.sec}$$

ب- باستخدام الكتل الفعالة بالجدول (١-٢) أنشئ جدول للقيم العددية لكل من N_c ، N_v للسيليكون والجرمانيوم وزرنخيد الجاليوم.

١٠- أسئلة غير مباشرة وتحتاج إلى تركيز :

أ - رقاقة سيليكون من النوع p ومشابة بانتظام بـ $N_A = 10^{15} / cm^3$. عند درجة الحرارة $T \approx 0\,K$، ما هى تركيزات الاتزان لكل من n، وp.

ب- تم تطعيم شبه موصل بتركيز شوائب N حيث $N >> n_i$ وكل الشوائب مؤينة.

أيضا $n = N$ و $p = n_i^2 / N$. هل الشائبة من النوع المانح أم المتقبل؟ اشرح.

جـ- تركيز الإلكترونات فى قطعة من السيليكون عند درجة حرارة 300 K فى ظروف الاتزان هو $10^5 / cm^3$ ما هو تركيز الشواغر ؟

د - فى عينة جرمانيوم غير مفككة تحت ظروف الاتزان عند درجة حرارة الغرفة، عرفنا أن $n_i = 10^{13} / cm^3$، $n = 2p$ ، و $N_A = 0$.

عين قيم n، N_D.

١١- احسب تركيزات الاتزان للإلكترونات والشغرات داخل عينة سيليكون مشابة بانتظام فى الظروف التالية:

أ - $T = 300\,K$، $N_A << N_D$ ، $N_D = 10^{15} / cm^3$.

ب- $T = 300\,K$، $N_A = 10^{16} / cm^3$، $N_D << N_A$.

جـ- $T = 300\,K$، $N_A = 9 \times 10^{15} / cm^3$، $N_D = 10^{16} / cm^3$.

د - $T = 450\,K$، $N_A = 0$، $N_D = 10^{14} / cm^3$.

هـ- . $T = 650\,K$، $N_A = 0$، $N_D = 10^{14} / cm^3$.

١٢- لكل حالة من حالات المسألة (١١)، حدد موضع E_i، احسب $E_F - E_i$ وارسم بعناية مخطط نطاق طاقة بمقياس رسم مناسب. ملاحظة :

$E_g\,(Si) = 1.08\,eV$ عند $T = 450\,K$

$E_g\,(Si) = 1.08\,eV$ عند $T = 450\,K$

١٣- طبقا لهذا الفصل فإن الحدود القصوى للإشابة لسيليكون غير مفكك عند درجة حرارة الغرفة هى $N_D \approx 1.6 \times 10^{18} / cm^3$، و $N_A \approx 9.1 \times 10^{17}$، تحقق من صحة هذه الأرقام.

الفصل الثالث

فاعليات حاملات الشحنة
CHARGE CARRIERS ACTION



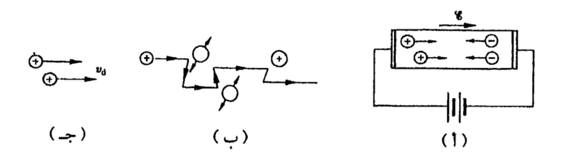
يعتبر النموذج الذى عرضناه فى الفصل السابق للحاملات عند حالة الاستقرار هاما؛ لأنه يشكل المرجع الصحيح لما يليه. لكن من وجهة نظر النبائط تصبح الأمور مثيرة للاهتمام فقط عندما تتحرك الحاملات لتشكل تيارا. فالنبيطة عادة ما تكون جزءا من دائرة إلكترونية وعليها أن تستجيب مع تيارات وجهود الدائرة المحيطة بها. وعليه فإن حركة الحاملات هى محور اهتمامنا فى هذا الفصل.

فى ظروف التشغيل الطبيعية توجد ثلاثة أنماط أولية لحركة الحاملات: الانسياق، والانتشار، والتوليد -الالتئام. وسنتعرض بالشرح والمعادلات لكل نمط على حدة وعلاقته بالتيار المار فى شبه الموصل. وبعد الجمع الحسابى لفعل الأنماط المختلفة نصل بالنهاية للمعادلات الأساسية التى تحكم عمل حركة الحاملات فى النبائط. ننهى هذا الفصل بأمثلة مبسطة لتوضيح طرق حل هذه المعادلات ولتقديم مبادئ إضافية مهمة.

(٣-١) الانسياق Drift

٣-١-١ الانسياق - تعريف وتصوير Drift - Definition and Visualization

الانسياق هو حركة الجسم المشحون بفعل المجال الكهربى. دعونا نتخيل أننا نستطيع رؤية الجسيمات المجهرية داخل شبه الموصل. إذا افترضنا أن المجال الكهربى يتجه من اليسار إلى اليمين (شكل ٣-١). يؤثر هذا المجال على الجسيم المشحون بقوة فيدفع حاملة الشحنة الموجبة (الشغرة) فى نفس اتجاه المجال بينما يدفع حاملة الشحنة السالبة (الإلكترون) فى الاتجاه المضاد. والمفترض أن تتسارع هذه الحاملات بفعل القوة



شكل (٣-١) تصوير انسياق الحاملة:

أ - حركة الحاملات داخل شبه الموصل يؤثر عليه مجال كهربى ناتج عن جهد انحياز.

ب - انسياق شغرة على مستوى المقياس المجهرى أو الذرى.

جـ- انسياق الحاملة على المقياس الكبير (الماكروسكوبى).

الناتجة عن المجال فتسير فى خطوط مستقيمة، ولكن هذا لا يحدث والذى يحدث فعليا أن مسارات الإلكترونات والشغرات تأخذ اتجاهات عشوائية بسبب التصادم مع أيونات الشوائب أو بسبب التصادم مع اهتزازات أنوية شبه الموصل نفسه. فعند درجة حرارة الغرفة تهتز أنوية شبه الموصل حول مواضعها فى الشبيكة بفعل الطاقة الحرارية. وبسبب حوادث التصادم هذه فإن حاملات الشحنة تتوقف (أى تهبط سرعتها إلى الصفر) عقب كل حادث تصادم كما فى شكل (٣-١ ب) ثم تعاود الحركة مرة أخرى.

من الواضح إذن أن تفاصيل حركة الانسياق لجسيم مفرد ليس فى مقدورنا معرفتها بدقة، ومن حسن الحظ أن الكميات التى يمكننا قياسها فى المعمل مثل التيار الكهربى تعكس فى الواقع متوسط حركة جميع الجسيمات معا. وعند إجراء المتوسط على كل الإلكترونات والشغرات عند أى زمن سنجد أن حركة كل حامل شحنة على حدة يمكن وصفها كحركة بسرعة انسياق ثابتة v_d. أى على مستوى شبه الموصل ككل، يمكن اعتبار أن حاملات الشحنة تسير فى خطوط مستقيمة موازية للمجال الكهربى وفى نفس اتجاهه (فى حالة الشغرات) أو فى عكس اتجاهه (فى حالة الإلكترونات) كما هو مبين فى الشكل ٣-١ (جـ).

من المهم أن نذكر أن الحركة الفعلية لحامل الشحنة عبارة عن مجموع حركتين: الأولى، حركة انسياق منتظم بفعل المجال الكهربى كما ذكرنا آنفا، أما الثانية، فحركة عشوائية ناتجة عن تصادم الحامل مع اهتزازات شبيكة شبه الموصل، وبالتالى فإن الإلكترونات فى نطاق التوصيل والشغرات فى نطاق التكافؤ فى حالة تبادل -خذ وهات- للطاقة مع شبيكة شبه الموصل من خلال هذه التصادمات. وتصل هذه السرعات لمائة ألف متر فى الثانية ولكن لكونها عشوائية الاتجاه فإن محصلتها تكون صفرا كما هو مبين بالشكل (٣-٢)، وبالتالى فإننا نسقطها من حساباتنا ونكتفى فقط بسرعة الانسياق التى وإن كان أصغر كثيرا من السرعة الحرارية إلا أن لها محصلة غير صفرية، وبالتالى تسبب تيارا يسمى بتيار الانسياق.



شكل (٣-٢) شكل مكبر للحركة الحرارية لحاملة

٣-١-٢ تيار الانسياق Drift Current

نتناول هنا التعبير الرياضى التحليلى لتيار الانسياق داخل شبه موصل. نعرف أن التيار هو مقدار الشحنة التى تمر خلال وحدة الزمن عبر مستوى عمودى على اتجاه سريان التيار. ولنأخذ شبه موصل من النوع p على هيئة قضيب له شكل متوازى مستطيلات كما هو مبين بالشكل (٣-٣) وله مساحة مقطع A ونختار المستوى A الذى ستعبر الشحنة خلاله داخل القضيب (الجزء المظلل بالشكل) ليكون عموديا على اتجاه سرعة الانسياق v_d. وإذا كان p هو تركيز الشغرات (أى عدد الشغرات داخل وحدة الحجم) نستطيع القول أن:

v_d t ... أى شغرة على هذه المسافة (أو أقل منها) ستعبر المستوى A خلال الفترة الزمنية t.

v_d t A ... كل الشغرات داخل هذا الحجم ستعبر المستوى A خلال زمن t.

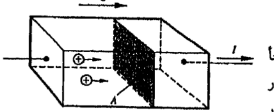
pv_d tA ... هو عدد هذه الشغرات التى ستعبر المستوى خلال زمن t.

qpv_d tA ... هى الشحنة التى ستعبر المستوى خلال زمن t.

qpv_d A ... هى الشحنة التى ستعبر المستوى خلال وحدة الزمن، وتمثل تيار انسياق الشغرات $I_{p/drift}$.

إذن تيار انسياق الشغرات :

$$I_{p/drift} = qp\, v_d\, A \qquad (3-1)$$



شكل (٣-٣) منظر ممتد لشبه موصل من النوع p تحت جهد انحياز (المسبب) للمجال ($\mathcal{E}$) ومساحة مقطعه A.

للتخلص من مساحة المقطع نلجأ إلى تعريف كمية متجهة هى كثافة التيار J . J هو متجه فى اتجاه سريان التيار ومقدار هذا المتجه هو التيار الذى يعبر وحدة سطوح (أى أن J=I/A)، وبالتالى يمكننا كتابة التعبير.

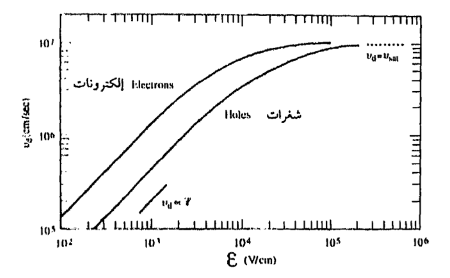
$$J_{p/drift} = qp\, v_d \qquad (3-2)$$

بما أن تيار الانسياق يحدث بفعل المجال الكهربى، فمن الطبيعى أن نخطو خطوة أخرى ونعبر عن كثافة التيار بدلالة المجال الكهربى. للوصول لهذا الهدف نستخدم

العلاقة بين المجال الكهربى وسرعة الانسـياق كما هى موضحة بالشكل (٣-٤). بالنظر لهذا الشكل يتضح لنا أن فى حـالة المجال الكهربى الضعيف فإن السرعـة تكون متناسبة مع شدة المجـال، وفى حالة المجـال الكهربى القـوى فإن السرعـة قد تصل إلى سـرعة التشبع v_{sat} ولا تزيد عنها، أى أن :

$$v_d = \begin{cases} \mu \mathcal{E} & \cdots \quad \mathcal{E} \to 0 \\ v_{sat} & \cdots \quad \mathcal{E} \to \infty \end{cases} \qquad (3\text{-}3)$$

الثابت μ هو ناتج قسـمة السرعـة على المجال عندمـا يكون المجال غيـر قوى، ويختـلف باختـلاف نوع الحامل إلكتـرون أو شـغرة، وبالتـالى يوجد ثابتـان أحدهمـا للإلكترونات μ_n، والآخر للشغرات μ_p.



شكل (٣-٤) سرعة انسياق الحاملات v_d المقاسة لسيليكون فائق النقاء عند درجة حرارة الغرفة كدالة فى المجال الكهربى المطبق $\mathcal{E}$

من الآن فصاعدا سيقتصر كلامنا على حالة المجال الكهربى الضعيف أو المتوسط، وبالتالى فإن سرعة الانسياق ستكون مـتناسبة مع المجال، وبالتعويض من المعادلة (3-3) فى المعادلة (3-2) نجد أن :

$$J_{p/drift} = q\,\mu_p\, p\, \mathcal{E} \qquad (3\text{-}4\text{-}a)$$

$$J_{n/drift} = q\,\mu_n\, p\, \mathcal{E} \qquad (3\text{-}4\text{-}b)$$

الثابتان μ_p، و μ_n يعرفان بحركية الشغرات وحركية الإلكترونات على التوالى. وهما ثابتان موجبان على الدوام. لاحظ أنه فى حالة الإلكترون تكون السرعة ضد المجال ($v_d=-\mu_n \mathcal{E}$)، لكن عند ضرب السرعة السالبة فى الشحنة السالبة، فإن التيار الناتج يكون موجبا ($J_{N/drift} = q\,\mu_n\, n\, \mathcal{E}$) أى باتجاه المجال مثله مثل تيار الشغرات.

٣-١-٣ الحركية (الانتقالية) Mobility

من الواضح أن الحركية هى وسيط (بارامتر) أساسى لتمييز الانتقال بالانسياق للإلكترونات والشغرات، وكما سنرى لاحقا فإن الحركية ستلعب دورا هاما فى تحديد أداء نبائط عديدة، وبالتالى سنتعرف هنا على بعض الخصائص الأساسية لهذا الوسيط المهم، والتى يمكن أن تفيدنا لاحقا.

الوحدة القياسية للحركية هى cm²/ V.sec، فى حالة السيليكون المشاب بنوعى الشوائب $N_D=10^{14}/cm^3$، و $N_A=10^{14}/cm^2$ عند درجة حرارة الغرفة فإن $\mu_n=1360 cm^2/V.sec$، و $\mu_p=460\ cm^2/V.sec$.

أما فى حالة Ga As النقى غير المعوض (أى فيه N_A، أو N_D أقل من $10^{15}/cm^3$) فإن الحركية عند درجة حرارة الغرفة تكون عالية فى حالة الإلكترونات $\mu_n \approx 8000\ cm^2/V.sec$، وفى حالة الشغرات تكون حوالى $\mu_p \approx 400\ cm^2/V.sec$، نستخدم القيم الموضحة سابقا عندما نريد إجراء حسابات تقريبية سريعة. نلاحظ أن حركية الإلكترونات تفوق حركية الشغرات، وهذا هو الحال دائما فى كل أشباه الموصلات الهامة.

علاقة الحركية بالاستطارة :

الحركية كلمة توحى بإمكانية الحركة بيسر، وهنا أيضا فإن الحركية فى شبه الموصل تعبر عن مدى سهولة تحرك حامل الشحنة. زيادة عدد التصادمات تؤدى إلى تقليل الحركية أى أن الحركية تتناسب عكسيا ومعدل التصادمات أو الاستطارة الحادثة فى وحدة الزمن. وآليات الاستطارة السائدة فى شبه الموصل غير المفكك، عادة ما تكون :

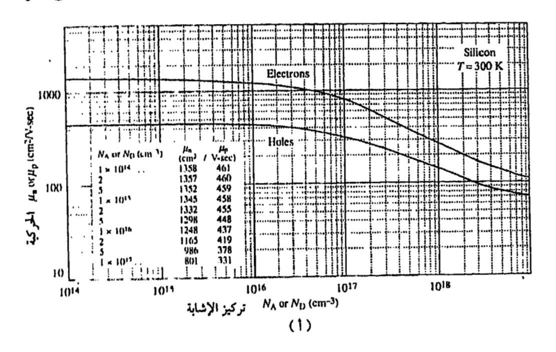
أ- استطارة الشبيكة حيث تتصادم الإلكترونات والشغرات مع الذرات المهتزة بسبب الطاقة الحرارية.

ب- الشوائب المتأينة أى استطارة الحاملات مع المجال الكهربى الناتج عن الشوائب المتأينة سواء المانحة منها والمتقبلة. لاحظ أن المجال الكهربى الناتج عن وجود ذرات شبه الموصل المضيف قد تم أخذه فى الاعتبار من خلال تعيين كتلة فعالة للجسيم الحامل للشحنة.

المعالجة الرياضية التفصيلية التى تربط الحركية مع الاستطارة هى من التعقيد بمكان لدرجة أننا لن نتعرض لها هنا ونكتفى بذكر أن الحركية μ تساوى $q < \tau > / m^*$، حيث $< \tau >$ هو الزمن الحر، وهو متوسط الفترة الزمنية بين استطارتين متتاليتين لنفس الحاملة. و m^* هى الكتلة الفعالة للتوصيل، وحيث إن زيادة التصادمات المعوقة ينجم عنها نقص فى الزمن الحر $< \tau >$ فنستنتج مرة أخرى أن الحركية تتناسب عكسيا ومعدل الاستطارة. تتأثر الحركية أيضا بكتلة حامل الشحنة حيث تزيد فى حالة الكتل الصغيرة وتقل للكتل الكبيرة. مثلا : m_n^* فى حالة GaAs تكون أصغر منها فى حالة السيليكون، وبالتالى هذا يفسر تفوق حركة الإلكترون فى GaAs عن مثيلتها بالسيليكون.

علاقة الحركية بالإشابة :

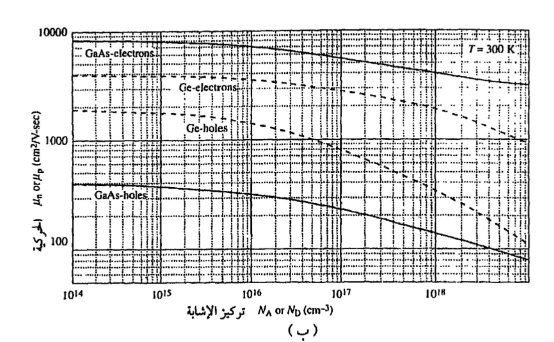
تظهر هذه العلاقة بوضوح فى الشكل (٣-٥) فى كل الحالات لا تتغير الحركية كثيرا طالما أن تركيز الإشابة دون $10^{15}/cm^3$، وبعد ذلك تؤدى زيادة الإشابة إلى هبوط



N_A or N_D (cm⁻³)	μ_n (cm² / V-sec)	μ_p (cm² / V-sec)
1×10^{14}	1358	461
2	1357	460
5	1352	459
1×10^{15}	1345	458
2	1332	455
5	1298	448
1×10^{16}	1248	437
2	1165	419
5	986	378
1×10^{17}	801	331

(أ)

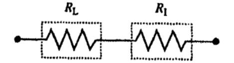
شكل (٣-٥) حركية الحاملات عند درجة حرارة الغرفة كدالة فى تركيز الإشابة
أ - فى السيليكون، ب- فى الجرمانيوم، و GaAs
μ_n هى حركية الإلكترون بينما μ_p هى حركية الشغرة



(ب)

تابع شكل (٣-٥) حركية الحاملات عند درجة حرارة الغرفة كدالة فى تركيز الإشابة
أ - فى السيليكون، ب - فى الجرمانيوم، وفى $GaAs$
μ_n هى حركية الإلكترون بينما μ_p هى حركية الشغرة

الحركيـة. يمكننا تفسير تغيـر الحركية بالنظر للشكل (٣-٦). هذا الشكل يمثل مـقاومتين على التوالى، ترتبط المقاومة R_L باستطارة الشبيكة والمقاومة R_I باستطارة الشوائب. عند التركيـز المنخفض للشوائب يمكن إهمـال الاستطارة الناتجة عن أيونات الشوائب بالـنسبة لتلك الناتجـة عن اهتزازات الشبـيكة أى المقاومـة الكلية R_{TOTAL} تكون متـساوية تقـريبا للمقاومة R_L. وعندما تسيطر استطارة اهتزازات الشبيكة والتى لا تعتمد على التركيزات N_A أو N_D فمن الطبيـعى أن تصبح الحركيـة غير معـتمدة على N_A، أو N_D. ولكن إذا زادت هذه التركيزات عن $10^{15}/\ cm^3$ فإننا لا نستطيع إهمال الاستطارة الناتجة عن وجود



شكل (٣-٦) المناظر الكهربى للاستطارة فى شبه موصل R_L ، R_I تمثلان معاوقة الحركة نتيجة لاستطارة الشبيكة واستطارة الشوائب المتأينة على التوالى،
R_L لا تتأثر بالإشابة وتقل مع انخفاض T.
R_I تزيد مع زيادة N_A أو N_D وتزيد مع ارتفاع T.

أيونات الشوائب. فى هذه الحالة فإن إضافة مزيد من الشوائب المتقبلة أو المانحة يؤدى إلى زيادة عدد مراكز الاستطارة، وهذا يعنى مزيدا من انخفاض قيمة حركية حاملات الشحنة.

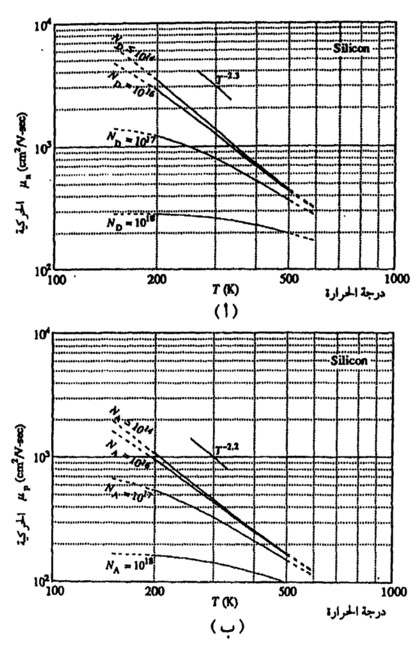
علاقة الحركية بدرجة الحرارة :

يبين الشكل (٣-٧) تغير حركية الإلكترونات والشغرات بالسيليكون مع تغير درجة الحرارة عند تركيزات شوائب مختلفة. كل منحنى بالشكل يمثل تركيز شوائب مختلفة. نلاحظ أن عند تركيزات شوائب (N_A أو N_D) أقل من $10^{14}/cm^3$، فإن البيانات تتوحد فى منحنى واحد يشمل كل هذه التركيزات. يتغير هذا المنحنى مع درجة الحرارة بعلاقة أسية، بأس ثابت تقريبا أى أن: $\mu_n \propto T^{-2.3\pm0.1}$، وكذلك: $\mu_p \propto T^{-2.2\pm0.1}$

وبما أن المحاور فى الشكل (٣-٧) هى محاور لوغاريتمية فإن علاقة الحركية مع درجة الحرارة بالكلفن تظهر كعلاقة خط مستقيم بقيمة ثابتة وسالبة للميل وتساوى الأس -2.3 ± 0.1 فى حالة الإلكترونات، ويساوى -2.2 ± 0.1 فى حال الشغرات. مع زيادة تركيزات الشوائب عن $10^{14}/cm^3$ نجد أن الحركية ما زالت تزيد مع انخفاض درجة الحرارة، ولكن يقل ميل الخط.

من السهل تفسير علاقة الحركية بدرجة الحرارة فى حالة تركيزات الشوائب المنخفضة. نحن نعرف أن فى هذه الحالة، تكون استطارة الشبيكة، هى المهيمنة، وبالتالى $R_{TOTAL} \approx R_L$ فى العينات المنخفضة الإشابة. ومع انخفاض درجة الحرارة تقل الاهتزازات الحرارية المسببة للاستطارة، ومن ثم تقل الاستطارة بالشبيكة، وفى هذه الحالة تتبع علاقة الحركية بدرجة الحرارة قانونا أسيا بسيطا بأس سالب.

من جهة أخرى، تتصرف العينات العالية الإشابة بطريقة أعقد لوجود استطارة الشوائب بجانب استطارة الشبيكة. ففى الوقت الذى تقل فيه استطارة الشبيكة مع انخفاض درجة الحرارة نجد أن استطارة الشوائب تزيد مع نقص درجة الحرارة؛ ذلك لأن خفض درجة الحرارة يؤدى إلى تباطؤ سرعة الإلكترونات والشغرات، وبالتالى تمضى وقتا أطول بجوار أيون الشائبة مما يؤدى إلى استطارتها من على الأيون المشحون بصورة أشد. أى أن مجال كولومب الكهربى الناشئ عن أيون الشائبة يحرف مسار حاملات الشحنة البطيئة -حيث التباطؤ يكون بسبب انخفاض درجة الحرارة- بصورة أكثر فاعلية. ومن هذه الصورة نجد أن استطارة الشوائب تزيد مع نقص درجة الحرارة، أى أن : $R_{TOTAL} \to R_I$ مع انخفاض درجة الحرارة.



شكل (٣-٧) الاعتماد على درجة الحرارة T لحركية : أ- إلكترون، ب- شغرة فى السيليكون المشاب من $10^{14}\ /\ cm^3$ حتى $10^{18}/cm^3$. الخطوط المتقطعة امتدادات تقريبية خارج المدى

$$200\,K \le T \le 500\,K$$

٣-١-٤ المقاومية Resistivity

ترتبط المقاومية الكهربية ارتباطا وثيقا مع حركية حاملات الشحنة. فمن الناحية الكيفية تعبر المقاومية عن إعاقة سريان التيار داخل المادة بسبب خصائص داخلية فى هذه

المادة ولكن لا تعتمـد على أبعاد العينة. أما من الناحـية الكمية فإن المقـاومية هى ثابت تناسب المجال الكهربى $\mathcal{E}$ داخل المادة مع قيمـة التيار الذى يمر خلال وحـدة المساحات (كثافة التيار J)، أى أن :

$$\mathcal{E} = \rho J \qquad (3\text{-}5\text{-}a)$$

أو :

$$J = \sigma \mathcal{E} = \frac{1}{\rho} \mathcal{E} \qquad (3\text{-}5\text{-}b)$$

حيـث توصيـلية المادة σ تسـاوى مقلـوب المقـاومية $\sigma = \frac{1}{\rho}$. فى المادة المتجانسة $J = J_{drift}$، وبالتالى فمن العلاقة (4-4) نحصل على :

$$J_{drift} = J_{n/drift} + J_{p/drift} = q\,(\mu_n n + \mu_p p)\,\mathcal{E} \qquad (3\text{-}6)$$

وبالتالى :

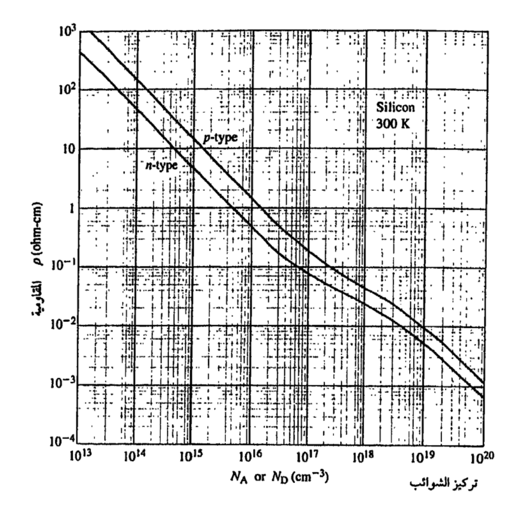
$$\rho = \boxed{\frac{1}{q\,(\mu_n n + \mu_p p)}} \qquad (3\text{-}7)$$

فـى حـالـة شبـه الموصل غيـر المفكك المشـاب بشـوائب مانـحة وعند المنطقـة المكتسبة (extrinsic) من مناطق درجات الحرارة، حيث $N_D >> n_i$، وبالتالى $n = N_D$، و $p \approx n_i^2/N_D << n$، وقد توصلنا لهذه النتيجـة من قبل فى الفصل السابق. وفى حالات الإشابة النمطية فإن $\mu_n n + \mu_p p \approx \mu_n N_D$ فى النوع n. وبالمثل فى حالة شـبه الموصل من النوع p فإن $\mu_n n + \mu_p p \approx \mu_p N_A$، ونتيجة لذلك، يمكن تبسيط العلاقة (3-7) فى عينات السيليكون العادية إلى :

$$\boxed{\rho = \frac{1}{q\,\mu_n N_D}} \qquad \text{نوع } n \qquad (3\text{-}8\text{-}a)$$

$$\boxed{\rho = \frac{1}{q\,\mu_p N_A}} \qquad \text{نوع } p \qquad (3\text{-}8\text{-}b)$$

بالرجوع لبيـانات اعتماد الحركـية على الإشابة وباستـخدام المعادلتين (3-8) يمكن الربط بين المقاومية (التى يمكن قياسهـا مباشرة) وبين الإشابة داخل شبه الموصل. النظرة الفـاحصة إلى المـعادلات (3-8) وكذلك المنحـنيات الموضحـة بالشكل (٣-٨) تبين أن المقاومية المقاسة يمكن أن تستخدم روتينيا لتحديد تركيزات الإشابة N_A أو N_D.

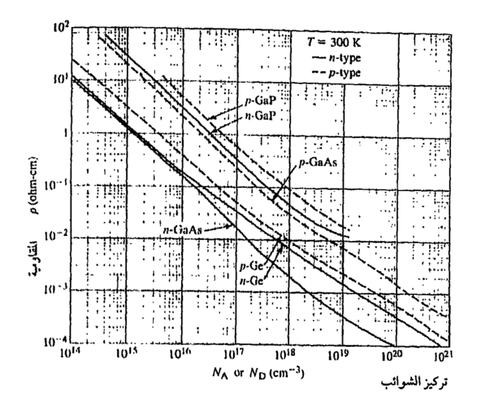


شكل (٣-٨ أ) تغير المقاومية مع تركيز الشوائب عند 300 K للسيليكون

يمكن تحديد المقـاومية بغرض تقيـيم الإشابة بعدة طرق. قد يبـدو أن أبسطها هو تصنيع شبه الموصل على هيئة قضيب ثم يوصل طرفيه بمصدر جهد، نقيس التيار المار ثم نستنتج المقاومية من المقاومة المقاسة.

$$\text{(المقاومة } R = \frac{V \text{ الجهد}}{I \text{ التيار}} = \frac{l \text{ الطول} \times \rho \text{ المقاومية}}{A \text{ مساحة المقطع}}\text{)}$$

من سوء الحظ أن هذه العملية ليست بسيطة، كما أن قياس أية رقاقة بهذه الطريقة يؤدى لإتلافها فضلا عن عدم مناسبة الطريقة للرقائق التى تستخدم فى صنع النبائط.

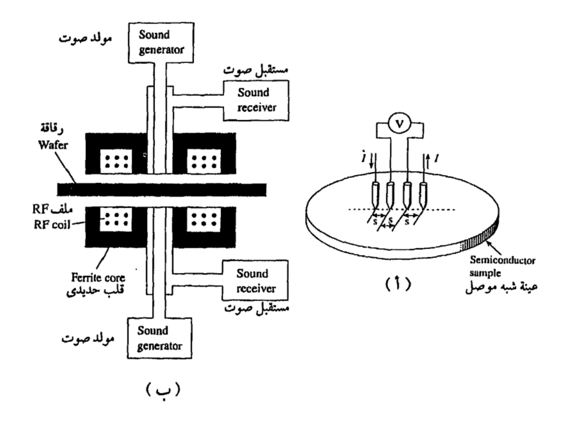


شكل (٣-٨ ب) مثل (أ) لكن لأشباه موصلات أخرى

والطريقة الشائعة هى طريقة مجس الأربع نقاط، فى هذه الطريقة تصطف أربعة مجسات فى خط مستقيم بحيث تكون المسافات بينها متساوية، كما بالشكل (٣-٩ أ) ثم تلامس سطح الرقاقة بالمجسات الأربعة. يمرر التيار I بين المجسين الخارجيين، بينما يستخدم الاثنان الداخليان لقياس فرق الجهد V، ويمكن تحديد مقاومية شبه الموصل من العلاقة :

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} \Gamma \qquad (3\text{-}9)$$

s المسافة بين مجسين متتاليين، و Γ هو عامل تصحيح معروف مسبقا. يتحدد العامل Γ طبقا لسمك الرقاقة، وطبيعة السطح الذى توضع فوقه الرقاقة معدنا كان أم عازلا. والأجهزة التجارية تحدد العامل Γ بعد أن يدخل المستخدم سمك الرقاقة. هذه الطريقة أكثر مناسبة من الطريقة التى ناقشناها مسبقا، كما أنها تسبب تلفا بسيطا للرقاقة. لكن أحيانا يكون هذا التلف مكلفا عند تصنيع النبائط والدارات المتكاملة مرتفعة التكلفة.



شكل (٣-٩) طرق قياس المقاومية

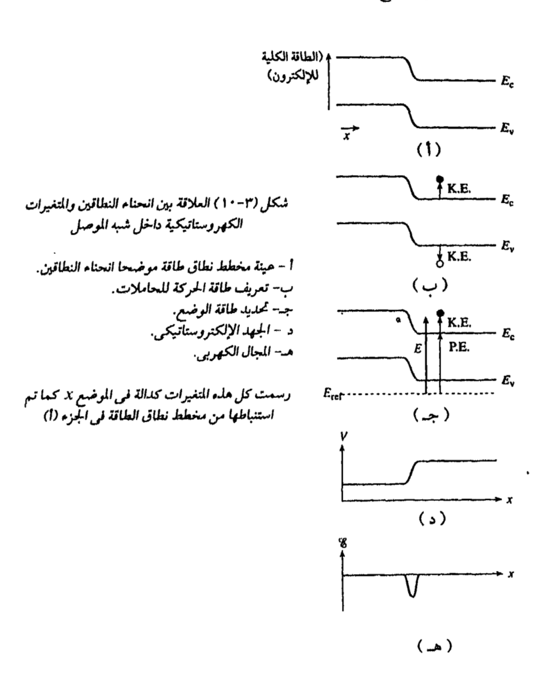
أ - رسم تخطيطي لترتيب المجسات والانحياز الكهربى فى قياس الأربعة مجسات.

ب- رسم تخطيطي لجهاز تجارى يعمل بالتيارات الدوامية Eddy current ، مبينا فيه ملفات التردد العالى RF والمركبات الصوتية.

هناك طريقة أخرى جديرة بالذكر وفيها يتم القياس بدون أى ملامسة للرقاقة، باستخدام التيارات الدوامية. يبين الشكل (٣-٩ ب) تخطيطا لجهاز تجارى يستخدم تيارات الحث الدوامية. يصدر الجهاز مجالا مغناطيسيا من القلب الحديدى ferrite الذي يحيط به ملف تردد راديوى RF. إذا وجدت مادة موصلة بالقرب من القلب المغناطيسى فإن المجال المغناطيسى المتغير RF يستحث تيارات دوامية موضعية بالمادة الموصلة. هذه التيارات تستهلك بعضا من الطاقة التى تغذى إلى الملفات RF. بقياس الجزء الممتص من القدرة RF يمكن تحديد المقاومية الصفحية sheet resistivity من خلال نظام مُعايَّر يمكن لهذه الأجهزة أن تقيس سمك الرقاقة باستخدام التداخل بين الموجات فوق الصوتية المنعكسة عن سطحى الرقاقة. لذلك يوجد مولدات وكواشف فوق صوتية بهذه الأجهزة. تحدد مقاومية الرقاقة بعد حساب حاصل ضرب المقاومية الصفحية فى سمك الرقاقة.

٣-١-٥ انثناء (انحناء) النطاقات Band Bending

عندما تـعرضنا لمخططات نطاق الطاقـة كنا نرسم سقف نطاق التـكافؤ E_V وقاع نطاق التوصيل E_C كخطوط مستقيمة أفـقية لتوضيح أن هذين المستويين (E_V, E_C) لهما قيمة ثابتة داخل شبه الموصل. لكن عند وجود مـجال كهربى داخلى فإن مستويى الطاقة E_V، E_C سيتغيران من موضع لآخر.



شكل (٣-١٠) العلاقة بين انحناء النطاقين والمتغيرات الكهروستاتيكية داخل شبه الموصل

أ - عينة مخطط نطاق طاقة موضحا انحناء النطاقين.
ب- تعريف طاقة الحركة للحاملات.
جـ- تحديد طاقة الوضع.
د - الجهد الإلكتروستاتيكى.
هـ- المجال الكهربى.

رسمت كل هذه المتغيرات كدالة فى الموضع x كما تم استنباطها من مخطط نطاق الطاقة فى الجزء (أ)

كمثـال على هذا التغييـر انظر الشكل (٣-١٠)، ويعبر عن هذا التغـير بمصطلح انثناء (انحناء) النطاق.

لكى نتعرف بدقة على ماهية العلاقة بين المجال الكهربى داخل شبه الموصل وانثناء النطاق دعونا نتفحص الشكل (٣-١٠)، نجـد أن المحور الرأسى فى الجزء (أ) يمثل الطاقة الكلية للإلكترون والتى تتزايد كلما اتجهنا لأعلى. أما المحور الأفقى فيمثل إزاحة الموضع داخل شبه الموصل: من معلوماتنا السـابقة نعلم أنه يلزم طاقة مقدارها Eg لكسر رابطة ذرة-ذرة أى لتوليد إلكترون فى قاع نطاق التوصيل وشغرة عند سقف نطاق التكافؤ.

وإذا كانت الطاقة الممـتصة $E = Eg$ تماما فـإن الإلكترون والشـغرة الناتجين لن يتوافر لهما أى فائض فى الطاقة أى أنهما سـيظلان بدون حركة تقريبا. لكن بامتصاص طاقة $E > Eg$ فإن الفائض $E - Eg$ سيكتسب كطاقة حركة KE للإلكترون فى نطاق التوصــيل وللشغــرة في نطاق التكافؤ (انظر الشكل ٣-١٠-ب). لتـحديد الأمور أكـثر نفترض وجود مسـتوى طاقة مرجعى E_{ref} (ونحن أحرار فى اختيار E_{ref} فى أى مستوى مناسب). كمـا بالشكل (٣-١٠ جـ) وهو المسـتوى الذى سنقيس منه طاقـة الإلكترون الكلية $E - E_{ref}$. تنقسم الطاقـة الكلية لقسـمين الجزء $E - E_C$ يعبـر عن طاقة الحـركة للإلكترون، وبالتالى فإن الجزء $E_C - E_{ref}$ سيمثل طاقة الوضع للإلكترون. عادة ما نختار E_{ref} لينطبق على E_V أو على E_C أو عند منتـصف المسافـة بينهمـا E_i. هذه الحرية فى اختيـار موضع E_{ref} تتفق مع مـفهومنا عن طـاقة الوضع كمـا تعلمناه فى الميكانيكا من حيث إنها يمكن أن تقاس من أى مستوى ثابت اختيارى.

تعتبـر طاقة الوضع هى المفتاح الذى سيـقودنا لتفهم العلاقـة بين المجال الكهربى داخل شبه الموصل والتغير الموضعى فى نطاقى الطاقة. وبالتحديد سنفترض أن فى الحالة العادية لن تـتعرض الإلكتـرونات والشغـرات لقوى مثل تلك الناتجـة عن وجود مـجال مغناطيسى أو تغـيرات موضعية لـدرجة الحرارة أو وجود تأثيرات ناشئـة عن الإجهادات الميكانيكية الداخلية، وبالتالى تأخذ فى الاعتـبار القوى الناتجة عن المجال الكهربى فقط. تخبرنا مبادئ الفيزياء أن طاقة الوضع .P.E لجسم مشحون بشحنة q- وموجود عند نقطة لها جهد كهروستاتيكى V هى:

$$P.\ E. \quad = \quad -qV \tag{3-10}$$

وقد ذكرنا لتونا أن :

$$P.\ E. \quad = \quad E_C - E_{ref} \tag{3-11}$$

إذن :

$$V = -\frac{1}{q}(E_C - E_{ref}) \quad (3\text{-}12)$$

$$\mathcal{E} = -\nabla V \quad (3\text{-}13)$$

حيث ∇ هو مؤثر الانحدار فى الفراغ الثلاثى الأبعاد والذى يئول فى الفراغ الأحادى البعد إلى مؤثر التفاضل العادى.

$$\mathcal{E} = -\frac{dV}{dx} \quad (3\text{-}14)$$

وبالتالى :

$$\mathcal{E} = \frac{1}{q}\frac{dE_C}{dx} = \frac{1}{q}\frac{dE_V}{dx} = \frac{1}{q}\frac{dE_i}{dx} \quad (3\text{-}15)$$

استطعنا كتابة المعادلة (3-15) بهذه الصورة؛ لأنه بجمع قيم ثابتة على E_V، وE_i يمكن الحصول على E_C وتفاضل هذه القيم الثابتة هو صفر. بعبارة أخرى E_C، E_i وE_V متوازية مع بعضها البعض.

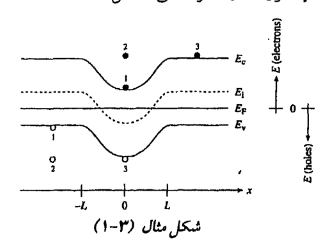
تمكننا العلاقة السابقة من تحديد المتغيرات الكهروستاتيكية مثل الجهد الكهربى V، والمجال الكهربى $\mathcal{E}$ من مخططات النطاق المبينة بالشكل (٣-١٠) أو غيره من الأشكال. تخبرنا المعادلة (3-12) أن منحنى الجهد $V(x)$ لا بد وأن يتغير مثل سالب $E_C(x)$، ولهذا فإن الجهد الكهربي V فى الشكل (٣-١٠ د) يماثل المنحنى E_C بعد قلبه رأسا على عقب (بسبب إشارة السالب الموجودة بالمعادلة (3-12)). لا ننسى أنه يمكن إزاحة منحنى الجهد V(x) إلى أعلى أو أسفل بأى قيمة ثابتة؛ لأن موضع الجهد المرجعى $V=0$ يمكن اختياره فى أى مكان على تدريج الطاقة دون أى تأثير على فيزياء الموضوع. فى النهاية فإن إجراء عملية تفاضل للمنحنى $E_C(x)$ (ويمكن إجراء ذلك بمجرد النظر) سيؤدى بنا إلى منحنى المجال الكهربى $\mathcal{E}(x)$ كما هو مبين بالشكل (٣-١٠ هـ).

باختصار، على القارئ أن يدرك أن مخططات انثناء النطاق تحوى معلومات كافية لتحديد الجهد الكهروستاتيكى والمجال الكهربى بداخل شبه الموصل. وبشىء من التدريب يمكن للقارئ رؤية تغير دالة الجهد الكهروستاتيكى V(x)، أو المجال الكهربى $\mathcal{E}(x)$ بمجرد النظر لمخططات انثناء النطاق. فالمنحنى $V(x)$ يرسم مشابها للمنحنى $E_C(x)$ (أو $E_V(x)$ أو $E_i(x)$) بعد قلبه رأسا على عقب، والمنحنى $\mathcal{E}(x)$ هو ميل المنحنى $E_C(x)$.

مثال ٣-١ :

الشكل الموضح أدناه يمثل شكل انثناء نطاق لعينة سيليكون عند T=300 K. اعتبر أن : $E_i - E_F = E_G / 4$ عند الموضعين $x = \pm L$، وأن $E_F - E_i = E_G/4$ عند $x = 0$.

لاحظ أننا أخذنا E_F كمستوى مرجعى للطاقة، كذلك لاحظ موضع المواقع المرقمة بالشكل للإلكترونات والشغرات فى الشكل.



شكل مثال (٣-١)

أ - ارسم رسما تخطيطيا للجهد الكهروستاتيكى $V(x)$.

ب- ارسم مخططا لتغير المجال الكهربى $\mathcal{E}$ داخل شبه الموصل.

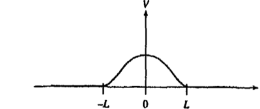
جـ- حدد طاقة الحركة K.E. وطاقة الوضع P.E. للإلكترونات والشغرات المبينة بالشكل.

د- عين المقاومية للجزء $x > L$ لشبه الموصل.

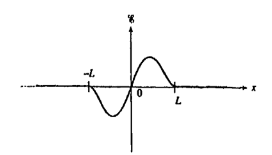
[اعتبر الحركية $\mu_p = 459$ cm^2/V-sec].

الحل :

أ - شكل دالة الجهد هو نفس $E_c(x)$ بعد قلبه رأسا على عقب. إذا اخترنا الجهد $V = 0$ عند $x = L$ سنرسم الشكل الآتى :



ب- المجال الكهربى يتناسب وميول النطاقات :



جـ- فـى حالـــة الإلكـــترونات فـإن $K.E. = E - E_C$، بينما : $P.E. = E_C - E_{ref} = E_C - E_F$. وبما أن طاقة الشغرات تزداد مع الاتجاه لأسفل بالشكـل فـإن $K.E. = E_V - E$، وكــذلك $P.E. = E_{ref} - E_V = E_F - E_V$ فى حـالة الشــغرات. وفــى الجـدول التالـى نوجـز قـيم طاقـات الحـركة $K.E.$ وطاقـات الوضع : $P.E.$

الحاملـة	$K.E$ (eV)	$P.E$ (eV)
إلكترون 1	0.00	0.28
إلكترون 2	0.56	0.28
إلكترون 3	0.00	0.84
شاغرة 1	0.00	0.28
شاغرة 2	0.56	0.28
شاغرة 3	0.00	0.84

د - فى المنطقة $(x > L)$، $E_i - E_F = \frac{E_G}{4} = 0.28$ eV

وبالتالى :

$$N_A = p = n_i \, e^{(E_i - E_F)/kT}$$

$$= 10^{10} \, e^{0.28/0.0259}$$

$$= 4.96 \times 10^{14} / cm^3$$

وحيث إن : $\mu_n = 459 \; cm^2/V.sec$

إذن :

$$\rho = \frac{1}{q\,\mu\,p\,N_A} = \frac{1}{(1.6 \times 10^{-19})\,(459)\,(4.96 \times 10^{14})}$$

$$\boxed{\rho = 27.5 \text{ Ohm-cm}}$$

مثال ٣-٢ :

عين مقاومية الجرمانيوم الذاتى عند 300 K، والذى له :

$$\mu_n = 3900 \text{ cm}^2/\text{ V.sec}$$

$$\mu_p = 1900 \text{ cm}^2/\text{ V.sec}$$

الحل :

عند 300 K $n_i = 2.5 \times 10^{13} / \text{cm}^3$

إذن :

$$\rho_i = \frac{1}{q\,(\mu_n+\mu_p)\,n_i} = \frac{1}{(1.6 \times 10^{-19})\,(5800)\,(2.5 \times 10^{13})}$$

$$\boxed{\rho_i = 43 \text{ Ohm-cm}}$$

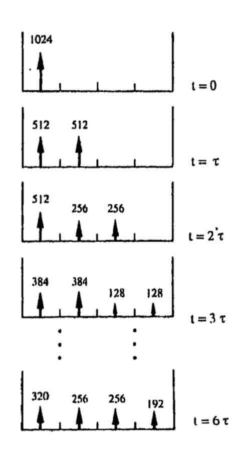
(٣-٢) الانتشار Diffusion

٣-٢-١ تعريف وتصوير Definition and Visualization

عملية الانتشار هى عملية إعادة توزيع للجسيمات كنتيجة للحركة الحرارية العشوائية وعلى المستوى الماكروسكوبى (الكبير) ينتج عنها هجرة من المناطق ذات التركيز العالى للجسيمات إلى المناطق قليلة التركيز. وإذا ترك الأمر لعملية الانتشار، فإنها تعمل على تساوى تركيز الجسيمات بانتظام فى جميع أرجاء المكان. ولا بد من ملاحظة أن ظاهرة الانتشار تخضع لها كافة الجسيمات المشحونة وغير المشحونة. والحركة الحرارية فقط، هى سبب الانتشار وليست القوى بين الجسميات بعضها وبعض أو أى قوى أخرى خارجية.

كمثال من الحياة اليومية افترض أنك فتحت غطاء قنينة عطر فى ركن من أركان الغرفة. وحتى فى غياب أى تيارات هوائية بالغرفة ستتكفل الحركة الحرارية العشوائية لجزيئات العطر بنشر رائحة العطر فى كافة أرجاء المكان حتى إلى داخل الشقوق التى لا تستطيع أن تدخل فيها إبرة. وبعد وقت قصير سيتساوى تركيز العطر- بعد نفاذه من القنينة بالطبع- فى كل مكان بالغرفة.

لنراقب ماذا يحدث على المستوى الميكروسكوبى (الصغير)، دعونا نناقش نموذجا بسيطا أحادى البعد. فلنأخذ صندوقا أحادى البعد به أربعة غرف مفتوحة على بعضها البعض، وأن الصندوق يحوى 2^{10}=1024 جسيما متحركا -انظر الشكل (٣-١١)- ولنفترض أن الجسيمات تتبع فى حركتها قواعد صارمة معينة. وبالتحديد فإنه بعد كل τ من الثوانى يقفز الجسيم الموجود فى أى غرفة للغرفة المجاورة. ونظرا لحركته العشوائية فإن احتمال القفز للغرفة على اليسار يساوى احتمال قفزه إلى الغرفة اليمنى (أى كلا الاحتمالين يساوى 50%). إذا قفز الجسيم نحو حائط الصندوق الأيسر أو الأيمن (أى لأى من الحائطين بأقصى اليمين أو اليسار) فإنه يعود مرتدا لغرفته الأصلية. وأخيرا نفترض أنه عند الزمن $t=0$ فإن كل الـ 1024 جسيما متواجدون بالغرفة بأقصى اليسار.



شكل (٣-١١) الانتشار على المقياس المجهرى (ميكروسكوبى) فى نظام افتراضى أحادى البعد. الأرقام فوق الأسهم تمثل عدد الجسيمات فى الغرف (الصناديق) الأربعة.

الأزمنة موضحة باليمين.

يسجل الشكل (٣-١١) تطور حركة الـ 1024 جسيم كدالة فى الزمن الذى يقاس بوحدات كل منها تساوى τ. عند الزمن $t = \tau$ فإن 512 من الجسيمات ستقرر القفز للغرفة 2 ناحية اليمين والـ 512 الأخرى ستقفز نحو الحائط الأيسر ومن ثم تعود للغرفة1 مرة أخرى. وعند الزمن $t = 2\tau$ سيقفز 256 جسيما من الغرفة 2 إلى الغرفة 3 ويعود 256 الأخرى للغرفة 1، وبالمثل سيقفز 256 جسيما من الغرفة 1 للغرفة 2 بينما يرتد من الحائط الـ 256 الباقية ومحصلة كل هذا أن : عند $t = 2\tau$ يصبح 512 جسيم بالغرفة 1، 256 جسيم بالغرفة 2 و 256 جسيم بالغرفة 3.

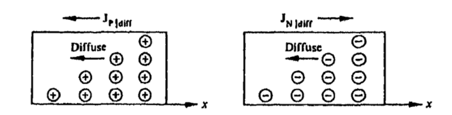
بنفس الطريقة تستطيع أن تتابع أعداد الجسيمات فى الغرف الأربعة عند الأزمنة $3\tau, 4\tau, 5\tau, ...$، ونلاحظ أنه بعد مرور زمن قدره 6τ يصير التوزيع شبه منتظم، بين الغرف الأربعة، ولا داعى أن نذهب أبعد من ذلك لتوضيح طبيعة عمل عملية الانتشار.

فى أشباه الموصلات، تحدث عملية الانتشار بطريقة مشابهة مع وجود بعض الفروق الهامة. .

أولها: أن حركة الإلكترونات والشغرات داخل شبه الموصل هى حركة ثلاثية الأبعاد وليست فى بعد واحد.

ثانيا: الحركة ليست قفز من الغرف، فلا توجد غرف فى شبه الموصل، بل هى حركة متصلة زمنيا ومكانيا.

وأخيرا فإن أعداد الجسيمات تكون أكثر بكثير من 1024، لكن فى الحالتين يوجد تأثير مشترك سواء فى حالة الصندوق الذى افترضناه أو فى شبه الموصل يتلخص فى أن الجسيمات تهاجر هجرة جماعية من مناطق التركيز العالى إلى مناطق التركيز المنخفض. ونلاحظ أيضا أنه فى شبه الموصل تكون الجسيمات -الإلكترونات، والشغرات- مشحونة كهربيا مما يؤدى لوجود ما يسمى بتيارات الانتشار كما هو موضح بالشكل (٣-١٢).



شكل (٣-١٢) تصوير انتشار الإلكترونات والشغرات
على المستوى الكبير (الماكروسكوبى)
مما يولد «كهربية تيار الانتشار»

خوارزمية لتصوير عملية الانتشار:

يمكنك باستخدام الخوارزمية المذكورة هنا أن تكتب برنامج حاسب باللغة التى تفضلها. عند كل زمن t يكتب البرنامج الزمن t أعلى الرسم ثم يرسم أعمدة بعدد الغرف، ارتفاع كل عمود يتناسب وعدد الجسيمات بالغرفة.

نفترض أن r_n يمثل عدد الجسيمات فى الغرفة رقم n حيث n عدد صحيح يأخذ القيم 1، 2، 3، . . . حتى عدد الغرف N. والخوارزمية المطلوبة هى:

خطوة 1: البداية : $t = 0$، اختر الأعداد الابتدائية r_n كما يحلو لك، ارسم الأعمدة.

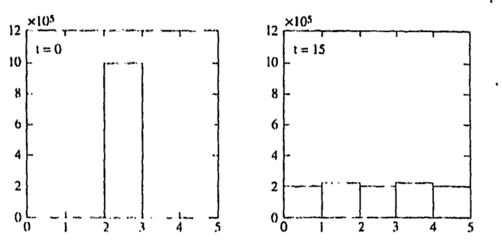
خطوة 2 : $t \leftarrow t+1$، $r_1 \leftarrow 0.5\,(r_1 + r_2)$، للغرف 2 حتى N-1 :

$r_n \leftarrow 0.5\,(r_{n-1} + r_{n+1})$، $r_N \leftarrow 0.5\,(r_{N-1} + r_N)$، ارسم الأعمدة.

خطوة 3 : كرر الخطوة 2 لأى عدد من المرات تختار مثلا لعشر مرات (أى حتى t=10) مع وضع فاصل زمنى (Pause) لمدة ثانية بين كل خطوة والتى تليها :

خطوة 4 : نهاية الخوارزمية.

عند تنفيذ البرنامج سترى بوضوح أنه بعد عدد قليل من الخطوات ستتساوى ارتفاع الأعمدة بفرض أنك وضعت كل الجسيمات فى الغرفة الأولى فى البداية، أما إذا وضعت الجسيمات فى البداية بالتساوى بين كل الغرف سنرى أن الأعمدة ستظل متساوية الارتفاع فى كل الأزمنة. كما هو مبين فى الشكل الآتى الذى يبين عينة من خرج الحسابات.

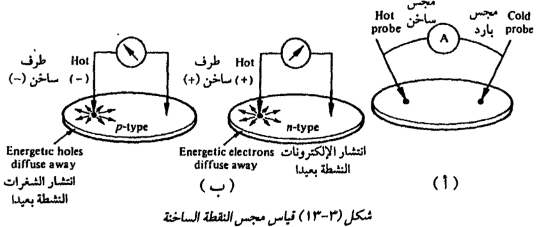


«عينة من خرج الحسابات»

٣-٢-٢ القياس بمجس النقطة الساخنة Hot-point Probe Measurement

يستخدم القياس باستعمال مجس النقطة الساخنة للتعرف سريعا على نوعية شبه الموصل هل هو من نوع n أم النوع p ؟ هذه المعرفة أساسية من الناحية العملية، ويجب أن تتوافر قبل إجراء أى تصنيع نبائط من مادة شبه موصل.

بل يجب معرفة نوع شبه الموصل حتى قبل قياس المقاومية عند الحاجة لمعرفة تركيزات الإشابة (ارجع للشكل (٣-٨)). نورد هذه الطريقة هنا لأنها تعتبر مثالا على استخدام الانتشار لإجراء قياس عملى.



شكل (٣-١٣) قياس مجس النقطة الساخنة
أ - المعدات المطلوبة. ب- تفسير مبسط لكيفية عمل القياس

بالنظر للشكل (٣-١٣ أ) سيتضح لنا أن كل المطلوب لعمل هذا القياس مجس ساخن ومجس بارد وميللى أميتر من النوع الذى يكون فيه صفر التدريج فى المنتصف، أى من النوع الذى يعطينا التيار مقدارا واتجاها. والقياس هنا بسيط للغاية. بعد التأكد من أن المجس الساخن قد قام بتسخين منطقة شبه الموصل الملامسة له نلاحظ انحراف مؤشر الميللى أميتر، ويعطى اتجاه الانحراف نوع شبه الموصل، وإذا أردنا زيادة قراءة الميللى أميتر يمكننا تقريب المسافة الفاصلة بين المجسين.

يقدم الشكل (٣- ١٣ ب) شرحا مبسطا لكيفية عمل مجس النقطة الساخنة. عند المنطقة الملامسة للمجس الساخن تتولد أعداد كبيرة من الجسيمات النشطة (وسبب نشاطها هو ارتفاع درجة حرارتها). هذه الجسيمات النشطة ستكون غالبيتها شغرات إذا كان شبه الموصل من النوع p، أو غالبيتها إلكترونات إذا كان من النوع n. فى وجود هذا الموضع ذى الوفرة من حاملات الشحنة النشطة يعمل الانتشار على توزيعها على باقى المواضع، ومن ثم يخلق نقصا للشحنة عند المجس الساخن، أو بقول آخر يعمل

على وجود شحنة سالبة عند المجس الساخن فى حالة النوع p أو وجود شحنة موجبة فى حالة النوع n، وبالتالى يكون انحراف الميللى أميتر فى النوع p مخالفا للانحراف فى النوع n.

٣-٢-٣ الانتشار والتيار الكلى Diffusion and Total Current

تيارات الانتشار

عند تعريف الانتشار وعند التعرف على تأثيره أكدنا على العلاقة المباشرة بين الانتشار والاختلافات الموضعية لأعداد الجسيمات. فلكى يحدث انتشار يجب أن يكون تركز الجسيمات فى موضع أكبر منه فى موضع آخر أى بالوصف الرياضى يلزم وجود تدرج غير صفرى للتركيز (أى $\nabla p \neq 0$ للشغرات، و $\nabla n \neq 0$ للإلكترونات) وكلما زاد هذا التدرج اشتد فيض الجسيمات. ويعبر رياضيا عن هذه الأفكار بقانون فيك، Fick law:

$$F = - D \nabla \eta \qquad (3\text{-}16)$$

حيث F هو الفيض أى عدد الجسيمات لكل cm^2 لكل ثانية التى تعبر مستويا عموديا على اتجاه سريان الجسيمات، η هى تركيز الجسيمات فى cm^3 بينما D يعرف بمعامل الانتشار، ودائما يكون موجب الإشارة.

الإشارة السالبة فى العلاقة (3-16) تبين أن سريان الانتشار يكون فى الاتجاه الذى تقل فيه η بانحدار أكبر. للحصول على كثافة تيار الانتشار للإلكترونات والشغرات نضرب الفيض فى شحنة الحامل.

$$J_{P/\text{diff}} = - q D_p \nabla p \qquad (3\text{-}17\text{-a})$$

$$J_{N/\text{diff}} = - q D_n \nabla n \qquad (3\text{-}17\text{-b})$$

ثابتا التناسب D_p، و D_n لهما وحدات cm^2/sec ويسميان على التوالى بثابت انتشار الشغرات، وثابت انتشار الإلكترونات. لاحظ اتفاق اتجاه التيارين المستنتجين من العلاقة (3-17) مع الاتجاه المبين فى الصورة الماكروسكوبية لتيارى الانتشار الموضحين بالشكل (٣-١٢). ففى حالتى الإلكترونات والشغرات نجد التدرج أحادى البعد موجبا، أى أن $\frac{dp}{dx} > 0$ ، $\frac{dn}{dx} > 0$؛ (لأن كلا من p، و n يتزايدا كلما اتجهنا يمينا)، وبالتالى فإن كلا من الإلكترونات والشغرات ستنتشر من اليمين إلى اليسار أى فى اتجاه $-x$.

وبذا يكون اتجاه $J_{P/diff}$ فى الاتجاه السالب $(-x)$، بينما اتجاه $J_{N/diff}$ فى الاتجاه الموجب $(+x)$.

التيارات الكلية Total currents

ينشأ التيار الكلى أو الإجمالى نتيجة للانسياق والانتشار معا. بجمع تيارى الشغرات والإلكترونات من المعادلتين (3-4)، (3-17) نصل إلى :

$$J_P = J_{P/drift} + J_{P/diff} = q\,\mu_p p\,\mathcal{E} - qD_p \nabla p \qquad (3\text{-}18\text{-}a)$$

$$J_N = J_{N/drift} + J_{N/diff} = q\,\mu_n n\,\mathcal{E} + qD_n \nabla n \qquad (3\text{-}18\text{-}b)$$

ويكون التيار الكلى المار فى شبه الموصل هو:

$$J = J_P + J_N \qquad (3\text{-}19)$$

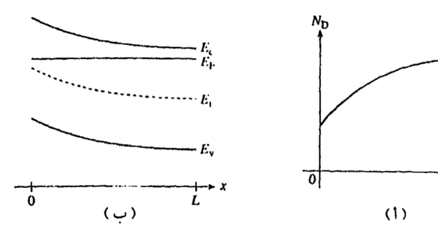
المعادلتان (3-18)، (3-19) وضعتا داخل صندوق مزدوج لتأكيد أهميتهما. فهما يستعملان بطريق مباشر أو غير مباشر فى معظم حالات تحليل عمل النبائط.

٣-٢-٤ ربط معاملات الانتشار بالمركبات

Relating Diffusion Coefficients / Mobilities

من الواضح أن معاملى الانتشار D_p, D_n لهما دور مركزى فى تحديد انتقال الحاملات عن طريق الانتشار. وقد يتبادر للذهن أن علينا أن نوليهما نفس درجة التفصيل والعناية التى أوليناها لتحليل الحركية فى مطلع هذا الفصل. لكن فى الواقع ليس من الضرورى تكرار هذه التفاصيل لسبب بسيط هو أن المعاملات $D's$ والحركيات $\mu's$ تربطهما ببعض علاقة مباشرة وبسيطة تسمى علاقة آينشتين.

لاستنباط علاقة آينشتين نأخذ شبه موصل غير منتظم الإشابة فى حالة اتزان، (أى درجة الحرارة منتظمة ولا توجد تيارات كبيرة تخل بالاتزان). وما نقصده هو توزيع غير منتظم للمانحات مثلا كما بالشكل (٣-١٤) داخل شبه موصل فى ظروف الاتزان.



شكل (٣-١٤) شبه موصل مشاب بغير انتظام
أ - التغير المفترض فى الإشابة مع الموضع.
ب- مخطط نطاق الطاقة المناظر.

الشكل (٣-١٤ أ) يبين بروفيل (مخطط جانبى) N_D كدالة فى x حيث x المسافة مقاسة داخل شبه الموصل من نقطة على السطح. نعلم من الفصل السابق أن فى شبه الموصل المنتظم الإشابة يقترب مستوى فرمى E_F من قاع نطاق التوصيل E_C كلما زاد تركيز المانحات. باختصار، الفاصل $E_C - E_F$ يقل بزيادة N_D. فى نفس الوقت بما أن شبه الموصل فى الشكل (٣-١٤) فى حالة اتزان (لا يوجد تغيير كبير فى درجات الحرارة أو تيارات كبيرة) فإن المستوى E_F لاعتبارات ميكانيكا إحصائية يظل أفقيا دون ميل لكل نقاط شبه الموصل. أى أن $\frac{dE_F}{dx} = 0$ ونعيد هنا التأكيد على هذه النتيجة الهامة:
«فى ظروف الاتزان يظل مستوى فرمى ثابتا داخل شبه الموصل وحتى داخل كل المواد الملامسة لهذا الشبه موصل».

ثبات E_F معناه أنه يرسم كخط أفقى مستوى داخل مخططات نطاقات الطاقة.

يمكن البرهنة على صحة مقولة ثبات مستوى فرمى E_F على اتساع العينة فى حالة وجود اتزان. من الطبيعى أن نفترض أن الاحتمال $f(E)$ لشغل مستوى الطاقة E لا يتغير بتغير الموضع؛ لأنه إذا زادت $f(E)$ فى المنطقة (أ) عنها فى المنطقة (ب) ستتحرك الجسيمات من (ب) إلى (أ) ولكن فى حالة الاتزان لا يوجد تيار، وبالتالى $f(E)$ لا تتغير مع الموضع. وبما أن مستوى فرمى يعرف بالعلاقة $f(E_F) = 0.5$ فإن E_F لن يتغير لكل مواضع العينة بل ولكل العينات المتزنة مع هذه العينة.

من أجل التوفيق بين مقولة أن E_F يجب أن يرسم كخط أفقى ومقولة أن E_C-E_F يتناقص مع تزايد تركيـز المانحات N_D فإننا نرسم مـخطط انثناء النطاق كمـا فى الشكل (٣-١٤ب).

سريان التيار تحت شروط الاتزان :

شروط الاتزان تعنى أن التيار الكلى يساوى صـفرا، وبما أن الإلكترونات تتصرف مستقلة عن الشـغرات فى حالة الاتزان فإن كثافة التيار الإلكتـرونى الكلى يساوى صفرا ($J_N = 0$)، وبالمثل لتيار الشغرات الكلى ($J_P = 0$).

وبالرجوع للمـعادلة (3-18) نجد أن تيـار الانسيـاق يجب أن يساوى فـى المقدار ويعاكس فى الاتجاه تيار الانتشار لكل نوع من الحاملات على حدة.

بالعودة للشكل (٣-١٤ أ) نجـد زيادة واضحة فى تركيـز الذرات المانحة مع زيادة x، وبما أن معظم المانحـات تكون متأينة فى درجـة حرارة الغرفـة فهذا معناه أن تركـيز الإلكترونات يزيد مع زيادة x أى أنه يوجد $\frac{dn}{dx} > 0$ ، والذى يتـسبب فى انتـشار الإلكترونات فى الاتجاه x- أو وجود تيار إلكترونى فى الاتجاه x+ (لأن شحنة الإلكترون سالبة).

يوجد أيضـا انثناء فى نطاقات الطاقة كمـا هو موضح بالشكل (٣-١٤ ب) وهذا الانثناء يؤدى لوجود مجال كـهربى مُبيَّت built-in يتجه نحو x- وهو الذى يسبب تيار انسيـاق إلكترونـى فى الاتجاه x- يلغى تيـار الانتشـار الإلكتـرونى لكى يكون التيـار الإلكترونى الكلى مساويا للصفر، كما ذكرنا سابقا. فحتى فى حالة الاتزان يمكن وجود تيارات غـير صفرية لكن العـبرة أن مجمـوعها لا بد وأن يساوى صـفرا. ويمكن النظر للمجـال الكهربى المبيت المتولد على أنه رد فـعل لوجود تيار الانتشـار الناشئ عن عدم انتظام تركيز المانحات.

علاقة آينشتين :

بعد أن أرسينا الأساس المناسب نشرع الآن فى اشـتقاق المعادلة التى تربط المعامل D بالحركية μ والتى تعرف بعلاقة آينشتين. ولتبـسيط الأمور نفترض أننا نعمل فى فراغ احادى البعد x (أى أن الأمور لا تتغير فى الاتجاه y أو z) وأن العينة محل التحليل هى شبه موصل غير مفكك مشاب بإشابة غير منتظمة وموجود فى حالة اتزان. وقد رأينا أن تيار الإلكترونات الكلى يساوى صفرا أى:

$$J_{N/\text{drift}} + J_{N/\text{diff}} = q\,\mu_n\, n\,\mathcal{E} + qD_N \frac{dn}{dx} = 0 \qquad (3\text{-}20)$$

لكن نعرف من المعادلة (3-15) أن :

$$\mathcal{E} = \frac{1}{q}\frac{dE_i}{dx} \tag{3-21}$$

وأن :

$$n = n_i\, e^{(E_F - E_i)/kT} \tag{3-22}$$

وبما أن $\frac{dE_F}{dx} = 0$ ؛ لأن E_F ثابت فإن :

$$\frac{dn}{dx} = -\frac{n_i}{kT}\, e^{(E_F - E_i)/kT}\, \frac{dE_i}{dx}$$

$$= -\frac{q}{kT}\, n\,\mathcal{E} \tag{3-23}$$

بالتعويض عن $\frac{dn}{dx}$ فى المعادلة (3-20) من المعادلة (3-23) ينتج أن :

$$(qn\,\mathcal{E})\,\mu_n - (qn\,\mathcal{E})\,\mu_n\,\frac{q}{kT}\,D_N = 0 \tag{3-24}$$

وبما أن $\mathcal{E} \neq 0$ ؛ لأن الإشابة غير منتظمة، بالتالى نجد أن :

$$\boxed{\frac{D_N}{\mu_n} = \frac{kT}{q}} \quad \text{علاقة آينشتين للإلكترونات} \tag{3-25-a}$$

$$\boxed{\frac{D_P}{\mu_p} = \frac{kT}{q}} \quad \text{علاقة آينشتين للشواغر} \tag{3-25-b}$$

· بالرغم أننا افترضنا حالة اتزان لكن يمكن الوصول لنفس النتيجة حتى فى حالة عدم الاتزان (سيكون الاشتقاق أطول مما يدعونا لعدم الدخول فيه). فى حالة شبه الموصل المفكك سيلزم إدخال بعض التعديل للعلاقة (3-25) (وأيضا لن نتعرض لهذه الحالة هنا). ملاحظة أخرى، مبدأ ثبات مستوى فرمى E_F فى حالة وجود اتزان، وتفاصيل ما يحدث داخل شبه موصل غير منتظم الإشابة تحت ظروف الاتزان هى موضوعات هامة فى حد ذاتها، أى أن أهميتها ليست مرتبطة فقط باشتقاق علاقة آينشتين. ومن ناحية الأرقام نذكر أن الكمية kT/q لها وحدات الجهد وتساوى 0.02589 V. عند $T = 300$ K (درجة حرارة الغرفة). فإذا افترضنا عينة سيليكون مشابة فيها $N_D = 10^{14}/cm^3$، $\mu_n = 1358\ cm^2 / V.sec$، فإن D_N ستساوى .

$$D_N = \left(\frac{kT}{q}\right) \mu_N = (0.0259)(1358) = 35.2 \text{ cm}^2/\text{sec}$$

مثال ٣-٣ :

سنستمر هنا فى فحص عينة شبه الموصل، التى لها شكل نطاق الطاقة المعطى فى مثال (٣-١).

أ - هذا الشبه موصل فى حالة اتزان. كيف تستنتج هذا من شكل نطاق الطاقة ؟

ب- ما هى كثافة تيار الإلكترونات J_N، والشغرات J_P عند النقطتين $x = \pm L$ ؟

جـ- ارسم مخططا تقريبيا يصف تغير n، p مع x داخل العينة.

د - هل يوجد تيار انتشار عند $x = \pm L/2$ ؟ وإذا وجد أشر إلى اتجاه سريانه.

هـ- استنادا لشكل المجال الكهربى بالمثال (٣-١) هل يوجد تيار انسياق عند $x = \pm L/2$ ؟ وإذا وُجد عيّن اتجاه سريانه.

و - كم تبلغ قيمة معامل انتشار الشغرات D_P فى المنطقة $x > L$ داخل شبه الموصل.

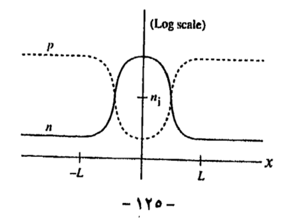
الحل :

أ - نستنتج أن شبه الموصل فى حالة اتزان؛ لأن مستوى فرمى E_F ثابت ولا يتغير مع الموضع.

ب- عند $x = L/2$، وعند $x = -L/2$ التيار الكلى $J_N = 0$، و $J_P = 0$. بل إن هذا ينطبق على كل المواضع مادام شرط الاتزان مستوفى.

جـ- استنادا إلى $n = n_i \exp[(E_F - E_i)/kT]$، وأيضا :

$p = n_i \exp[(E_i - E_F)/kT]$، يمكن رسم تغير n وp مع x هكذا :



د – نعم يوجد تيار انتشار للإلكترونات عند $x = -L/2$ و $x = +L/2$.. من إجابة الجزء (جـ) نجد أن dn/dx موجب عند $x = -L/2$، وبالتالى التيار يسرى فى الاتجاه الموجب ($+x$)، وعلى العكس dn/dx سالب عند $x = +L/2$، فيكون اتجاه تيار الانتشار للإلكترونات فى الاتجاه السالب (أى $-x$) عند $x = +L/2$.

هـ- بما أن $\mathcal{E}$ و n ليستا صفرا عند $x = \pm L/2$، يصبح تيار الانسياق $J_{N/drift} = q\,\mu_n \mathcal{E}$ لا يساوى صفرا. نعلم أن اتجاه سريان تيار الانسياق يتبع دائما اتجاه المجال الكهربى وبالتالى $J_{N/drift}$ فى الاتجاه السالب عند $x = -L/2$ وفى الاتجاه الموجب عند $x = L/2$. طبعا تيار الانسياق لا بد وأن يلغى تيار الانتشار حتى يكون التيار الكلى مساويا للصفر حسب شروط الاتزان. اتجاهات تيار الإلكترونات يمكن تلخيصها فى هذا الجدول :

	$x = +L/2$	$x = -L/2$
$J_{N/diff}$	→	←
$J_{N/drift}$	←	→

و – من الجزء (د) بالتمرين (٣–١) وجدنا أن $N_A = 5\times10^{14}$، ومن منحنى الحركية -الإشابة فى الشكل (٣–٥ أ) يمكن تحديد الحركية $\mu_p = 459\ cm^2/V.sec$، ومن علاقة آينشتين نحصل على : $D_p = (kT/q)\,\mu_p = (0.0259)(459) = 11.9\ cm^2/sec$.

(٣-٢) الالتئام - التوليد Recombination - Generation

٣-٢-١ تعريف وتصوير Definition - Visualization

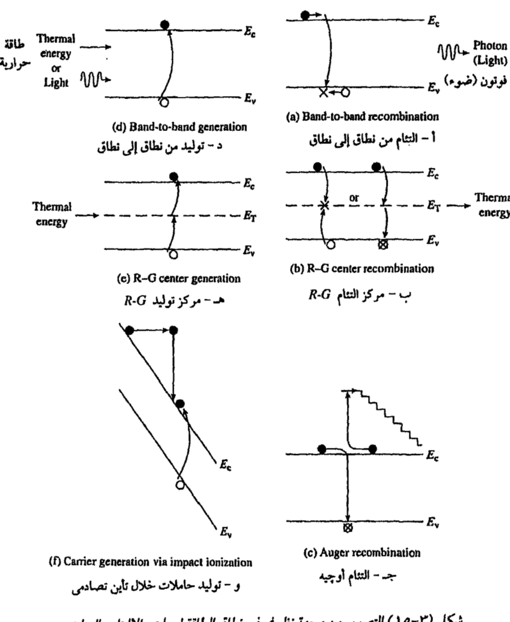
عند قلقلة شبه الموصل بعيدا عن الاتزان فلا بد أن تطرأ زيادة أو فقد فى تركيزات الحاملات بعيدا عن قيم الاتزان لهذه التركيزات. الالتئام -التوليد (Recombination - generation أو باختصار R-G) هى وسائل الطبيعة لاستعادة الاتزان. وهى تقوم على استقرار قيم الزيادة أو الفقد فى التركيزات فى حالة دوام القلقلة أو تؤدى إلى اضمحلال تلك التغيرات بعد زوال سبب القلقلة للعودة بالتركيزات لقيم الاتزان السابقة. فى نمط التشغيل العادى، النبيطة عادة ما تكون فى عدم اتزان وهنا تؤدى عمليات الالتئام- التوليد دورا هاما فى صياغة مميزات characteristics النبيطة. يمكن تعريف عمليات الالتئام- التوليد كالآتى:

الالتئام : هى العملية التى بموجبها يتقابل إلكترون مع شغرة ويصيران إلى فناء أو زوال مع انطلاق طاقة.

التوليد : هى العملية التى تؤدى إلى خلق زوج إلكترون - شـغرة بعد امتصاص طاقة.

بعكس الانسياق والانتـشار فإن الالتئام أو التـوليد ليست عملية واحـدة. فهذان المصطلحان يشملان عددا من العمليات المختلفة التى تؤدى إلى فناء أو إنتاج الحاملات.

أهم عمليـات الالتئام - التـوليد موضـحة بالشكل (٣-١٥) وسنشـرع فى شرح تفاصيل هذه العمليات الآن.



شكل (٣-١٥) التصوير من وجهة نظر نموذج نطاق الطاقة لعمليتى الالتئام والتوليد

التئام نطاق لنطاق

يعتبر مفهوم التئام نطاق لنطاق هو الأبسط فى مجمل عمليات الالتئام. كما هو موضح بالشكل (٣-١٥ أ)، فهو يعنى إفناء مباشر لإلكترون بنطاق التوصيل مع شغرة بنطاق التكافؤ. فى أثناء تحرك الإلكترون والشغرة عبر الشبيكة قد يتصادف وجودهما بالقرب من بعضهما البعض، أى تواجدهما معا فى حيز صغير، عندئذ سيفنى الإلكترون مع الشغرة ويختفيان. والطاقة الناشئة عن عملية الالتئام عادة ما تتحول إلى فوتون ضوئى.

مراكز الالتئام R-G

تحتاج عملية الالتئام الموضحة بالشكل (٣-١٥ ب) لوسيط لكى تتم، بالتالى فإنها تحدث فقط عند مواضع معينة فى شبه الموصل تسمى بمراكز الالتئام *R-G*. من الناحية الفيزيائية مراكز الالتئام *R-G* قد تُكوّن عيوبا شبيكية أو ذرات شوائب خاصة مثل ذرات الذهب فى السيليكون. وحتى فى أنقى أشباه الموصلات لا بد وأن توجد عيوب شبيكية وذرات شوائب. لكن فى أشباه الموصلات المستخدمة لصناعة النبائط فعادة ما يكون عدد هذه العيوب أو هذه الذرات الشائبة أقل بكثير من عدد الذرات المانحة والمستقبلة. لاحظ أن الشوائب التى تعمل كمراكز التئام تختلف فى النوع والدور الذى تقوم به عن ذرات الشوائب التى تستخدم كمانحات أو متقبلات. فمثلا من وجهة نظر أشكال النطاق نجد أن الشوائب بصفة عامة تقحم مستويات طاقة فى المنطقة الممنوعة بين نطاقى التوصيل والتكافؤ (فجوة النطاق). لكن بينما تكون مستويات الطاقة الإضافية هذه قريبة من أحد النطاقين فى حالة المانحات والمتقبلات نجدها فى حالة الشوائب التى تعمل كمراكز التئام *R-G* بعيدة عن النطاقين وقريبة من منتصف فجوة الطاقة. يرمز لمستوى الطاقة المرتبط بنوع معين من مراكز الالتئام بالرمز E_T (انظر الشكل ٣-١٥ ب). هذه المستويات الواقعة قرب منتصف الفجوة لبعض الشوائب التى تعمل كمراكز التئام موضحة بالشكل (٣-١٦). من هذا الشكل نرى أن العناصر التى تعمل كشوائب مراكز التئام فى السيليكون هى الذهب Au، النحاس Cu، المنجنيز Mn، الكروم Cr، والحديد Fe.

E_c

منتصف الفجوة

E_v

Au Cu Mn Cr Fe

شكل (٣-١٦) إدخال مستويات طاقة قرب منتصف الفجوة نتيجة للشوائب الشائعة فى السيليكون. عندما تدخل شائبة عدة مستويات فإن واحدا فقط هو الذى يهيمن فى عينة معطاة

وكما هو مبين فى الشكل (٣-١٥ ب) فإن عملية الالتئام عند مركز التئام R-G تتم على خطوتين: أولا، يمكث نوع من الحاملات (الإلكترون مثلا) بالقرب من مركز R-G وفى وقت لاحق تصطاد بئر الجهد الناشئ عن وجود الإلكترون المحبوس - الحامل الآخر (الشغرة). وتحدث عملية الالتئام التى تؤدى إلى فناء الحاملتين. ومن وجهة نظر مغايرة يمكن أن نقول أن الإلكترون بالشكل (٣-١٥ب) يفقد طاقته على مرحلتين: الأولى عند انتقاله من نطاق التوصيل لمستوى الطاقة E_T، والثانية عندما ينتقل من E_T إلى نطاق التكافؤ حيث يفنى مع شغرة. أحيانا يسمى الالتئام عند مراكز الالتئام R-G بالالتئام غير المباشر. والطاقة الناتجة عن هذا النوع من الالتئام عادة ما تنطلق فى صورة طاقة حرارية أى تنتج اهتزازات شبيكة، بلغة ميكانيكا الكم -حيث يعبر عن اهتزازات الشبيكة بالفونونات- فإن الالتئام غير المباشر لا يتم إلا من خلال وسيط: إما فونون أو ذرة شائبة.

التئام أوچيه Auger

يسمى هذا الالتئام باسم العالم الفرنسى أوچيه الذى رحل عن عالمنا من سنوات قليلة. الشكل (٣-١٥ جـ) يصور ما يحدث. يلتئم إلكترون بشغرة بالتئام نطاق لنطاق لكن الطاقة المنطلقة لا تذهب إلى كمة ضوء (فوتون) ولكن يفوز بها إلكترون آخر قريب من موضع الالتئام، هذا الإلكترون الذى نجا من عملية الالتئام؛ (لأن الإلكترون الأول فنى فى الشغرة) يأخذ الصدمة، وبالتالى ينتقل إلى مستوى طاقة عال داخل نطاق التوصيل (أى يكتسب طاقة حركة). ولكنه لا يحتفظ بهذه الطاقة طويلا . فبعد زمن يقاس بالبيكوثانية (10^{-12} ثانية) يفقد هذه الطاقة للشبيكة على هيئة اهتزازات (أى مطلقا فونونات) وهو ما يعبر عنه فى الرسم بالسلم النازل. وكل درجة من درجات هذا السلم تمثل فقدا للطاقة لأحد الفونونات وهو ما يسمى بالإحرار thermlization. أى أن التصادم مع اهتزازات الشبيكة (الفونونات) هو وسيلة ناجعة وسريعة لامتصاص طاقة حركة أى إلكترون ساخن (الإلكترون الذى طاقته فوق قاع نطاق التوصيل).

عمليات التوليد

يمكن عكس اتجاه أى عملية التئام ذكرناها لنحصل على عملية توليد. عملية توليد نطاق لنطاق حيث يستثار الإلكترون مباشرة من نطاق التكافؤ لنطاق التوصيل كما بالشكل (٣-١٥ د). الطاقة اللازمة لتوليد نطاق لنطاق قد تجىء من كمة ضوء (فوتون) أو من الطاقة الحرارية. وإذا كانت الطاقة الممتصة هى الطاقة الحرارية فإن العملية تسمى بالتوليد الحرارى المباشر. أما إذا جاءت من ضوء خارجى ممتص فعندئذ يكون اسمها هو

التوليد الضوئى photogeneration. ويصور الشكل (٣-١٥ هـ) عملية توليد حرارى لكن بمساندة من مراكز *R-G* التى تعمل كوسيط. وأخيرا فإن التأين الصدمى impact ionization الموضح بالشكل (٣-١٥ و) هو العملية العكسية لالتئام أوچيه. فى هذه العملية يولد زوج إلكترون -شغرة كنتيجة للطاقة المنطلقة من تصادم حامل شحنة ذى طاقة كافية مع اهتزازات الشبيكة. ولكن متى يستطيع حامل الشحنة اكتساب الطاقة اللازمة؟ بالطبع فى وجود مجال كهربى خارجى قوى. وقد يتبادر للذهن سؤال آخر: ماذا نعنى بتصادم حامل شحنة مع اهتزازات الشبيكة؟ الشبيكة بها ذرات على مسافات منتظمة، هذه الذرات تهتز بفعل الطاقة الحرارية، وبالتالى يمكن اعتبارها نواسات صغيرة (النواس هو البندول). هذه النواسات لا تهتز مستقلة الواحدة عن الأخرى بل تهتز بطريقة جماعية؛ لأنها ترتبط بعضها ببعض بقوى كهربية والتى يمكن تمثيلها بنوابض صغيرة. إذن الشبيكة عبارة عن نواسات صغيرة وكل نواس مرتبط بجيرانه بنوابض صغيرة (النابض هو الزمبرك). فى هذه الحالة عندما يتصادم إلكترون مع ذرة فإنه لا يتصادم معها بمفردها إنما هو يتصادم مع هذا النظام المهول من النواسات والنوابض المهتزة جماعيا. إن الإلكترون فى حقيقة الأمر يتصادم مع اهتزازات الشبيكة (الفونونات) ككل وليس مع ذرة بعينها.

٣-٣-٢ اعتبارات كمية الحركة Momentum Considerations

تحدث الأنواع المختلفة من عمليات الالتئام -التوليد بصفة مستمرة فى كل أشباه الموصلات حتى الموجودة منها فى حالة الاتزان. والذى يميز عملية عن أخرى هو معدل حدوثها. العملية المهيمنة هى تلك التى تحدث بمعدل سريع، وبالتالى فى ظروف معينة نجد أن عملية معينة هى الأكثر أهمية وعمليات أخرى احتمال حدوثها ضئيل. فمثلا نأخذ التئام أوچيه. بما أن عدد تصادمات حاملة مع حاملة تتزايد مع زيادة تركيز هذه الحاملات بالتالى نتوقع زيادة توافر التئامات أوچيه مع زيادة تركيز الحاملات، ولذا نهتم بالتئام أوچيه فقط فى المناطق المرتفعة الإشابة داخل النبيطة بينما نهمله فى بقية المناطق. بالمثل يعتبر توليد التأين الصدمى فى المناطق ذات المجال الكهربى العالى داخل النبيطة.

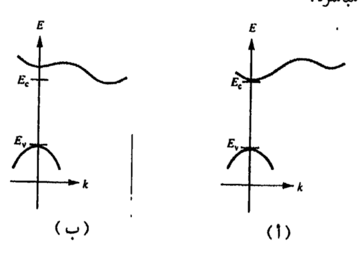
من جهة أخرى يعتبر التوليد الضوئى ذا أهمية فقط عند تعرض شبه الموصل للضوء. والسؤال هنا ما هى عمليات الالتئام -- التوليد التى عادة ما تهيمن عندما يكون المجال الكهربى منخفضا ويكون شبه الموصل مشابا وغير مفكك عند درجة حرارة الغرفة.

هذه هى الظروف التى تكون عليها غالبية مناطق النبيطة. من المعلومات المتوافرة لدينا نستطيع أن نختار الالتئام - التوليد نطاق لنطاق، وكذلك تلك التى تحدث عبر مراكز *R-G* كمرشحين أساسيين.

وقد نتوقع أن تتفوق فى هذه الظروف عمليات الالتئام - التوليد نطاق لنطاق على عمليات الالتـئام - التوليد عبـر مراكز R-G، وذلك عندما ننظر لأشكال نطاق الطاقة. ولكن هذا ليس صحيحا؛ لأن الأشكال التى أوردناها حتى الآن يكون فيها الموضع x هو المحور الأفقى، وبالتالى فلا تحمل أى معلومات عن كمية حركة الحاملات. وفى كل من الميكانيكا الكلاسيكية أو مـيكانيكا الكم لا تتغير كمـية التحرك الكلية بعد التـصادم عنها قبل التصادم. وهنا أيضا تلـعب كمية التحرك دورا هاما فى تحديد معـدل عملية التئام - توليد.

فى أشكال النطاق من النوع E-k ترسم الطاقات المسموح بها على المحور الرأسى بينما يرسم على المحور الأفقى كمية التحرك (عادة ما نطلق على عدد الموجة k مصطلح كمية التحـرك لأنهما متناسبان، فكمية التـحرك تساوى عدد الموجة k مضروبا فى ثابت بلانك ħ أى $p=\hbar k$، حيث p هو كمية حركة البلّورة).

يمكن تقسيم منحنيات E-k إلى نوعين رئيسيين: **النوع الأول** يشير إلى ما يسمى بشـبه الموصل المبـاشر حـيث تقع أدنى نقطة فى قـاع نطاق التوصـيل، وأعلى نقطة فى سقف نطاق التكافؤ عند $k = 0$. **والنوع الثانى** والمسمى بشبه الموصل غير المباشر نجد أن أدنى نقطة لنطاق التوصيل تكون عند $k \neq 0$ بينما تظـل أعلـى نقطة بنطاق التكافـؤ عند $k = 0$ (انظر الشكل ٣-١٧). وأشهر أنواع أشباه الموصلات المباشرة هى GaAs وعموما فإن كـثيرا مـن أشباه الموصـلات المركبة مـن عناصر العمـود الثالث والخـامس بالجدول الدورى تكون مـباشرة. من ناحـية أخـرى السيليكون وكـذلك الجرمـانيوم هى أشـباه موصلات غير مباشرة.



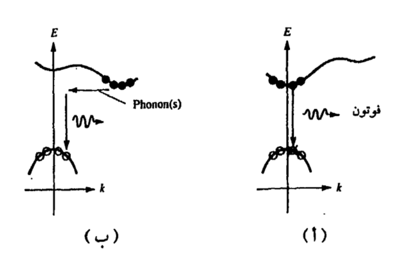
شكل (٣-١٧) الأشكال العامة لمنحنيات E-k فى أشباه الموصلات
أ- المباشرة، ب- غير المباشرة

لكى نجعل منحنيات E-k مفيـدة فى تصوير عمليات الالتئـام - التوليد يجب أن ننتبه لطـبيعة الانتقـالات الإلكترونية المرتبطة بامتـصاص وانبعاث الفـوتونات أى كمات الضوء والفـونونات أى اهتزازات الشـبيكة (لاحظ أن الضوء عـبارة عن اهتـزازات أيضا لكن اهتزازات للمجـالات الكهرومغناطيسية). الفـوتونات بطبيعتها تحـمل طاقة مناسبة (تكفى لركل إلكترون من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصـيل) ولكن لكون كتلتها الساكنة تساوى صفرا فـإن كمية الحركة تبـدو صغيرة جدا بالمقارنة بكميـة تحرك الإلكترونات فى أشبـاه الموصلات، وبالتـالى فعندمـا يتسـبب فوتون ممتص فى ركل إلكتـرون من نطاق التكافؤ إلى التوصيل فإن كـمية الحركة للإلكترون لا تتغير (إلا تغيـرا طفيفا جدا)؛ ولذا نرمز فى الأشكال E-k للانتقال الإلكترونى المباشـر من نطاق لنطاق بسهم رأسى تقريبا. إذا كان السـهم لأسفل فهـذا معناه التـئام نطاق لنطاق مع انبـعاث فـوتون. أمـا إذا كان للأعلى فهذا معناه توليد نطاق لنطاق مع امتصاص فوتون.

من ناحية أخرى فـإن الفونونات تكون طاقتها مـتواضعة (من 10 إلى 50 ميللى إلكترون-فـولت) لكن نظرا لكتلة ذرات الشبيكـة الكبيرة فإن الفـونونات تتمتع بكمـية حركة كـبيرة وكافية لجـعل عمليات الالتئام - التـوليد فى أشباه الموصلات غيـر المباشرة ممكنة. أيضـا نريد أن نذكّر هـنا بمعلومة تهـمنا، وهى أن الإلكتـرونات تشغل حـالات الوادى الأكثـر انخفاضا بنطاق التـوصيل كمـا أن الشغرات تشغل حـالات الذروة العليا بنطاق التكافؤ، تماما مثلما تستقر الكرة بالموضع الأكثـر انخفاضا فى حفرة أو كما يستقر البالون الملىء بالهيليوم بالموضع الأكثر ارتفاعا بسقف الحجرة.

دعونا نتفـحص الآن عملية التئام نطاق لنطاق. فى شبـه الموصـل المباشـر تكون قيم k للإلكترونات والشغرات قريبة من $k = 0$، وبالتالى عملية التئام نطاق لنطاق تحدث بإطلاق فوتون واحـد، وذلك لعدم الإخلال بقانونى بقـاء الطاقة، وكميـة الحركة (انظر الشكل ٣-١٨ أ). وفى الناحية الأخرى نجد أن عملية التئام نطاق لنطاق فى شبه موصل غير مباشر تحتاج لتغير كبير فى كمية الحركة. هنا انطلاق فوتون فقط قد يتماشى مع بقاء الطـاقة لـكنه ينتهـك قـانون بقاء كمـية الحركـة. للتوافق مع القـانونين معـا فلا بد أن يصاحب هذا الالتئام انبعـاث فونون يـليه انبعـاث فوتـون كما هـو مـبين بالشكـل (٣-١٨ ب).

الطبيـعة المعقدة لالتئـام نطاق لنطاق فى أشباه الموصـلات غير المباشـرة والراجعة لضرورة انبـعاث فوتون وفـونون معا ينتج عنـه تباطؤ معـدل الالتئام؛ ولهـذا نهمل فى السيليكون (وفى كافة أشـباه الموصلات غير المباشرة الأخرى)عـملية الالتئام نطاق لنطاق



شكل (٣-١٨ أ) التصوير بواسطة منحنى E-k لعملية التئام فى شبه موصل
أ - مباشر، ب- غير مباشر.

بالمقارنة مع عمليات الالتئام بمراكز R-G. الالتئام نطاق لنطاق ملائم لأشباه الموصلات المباشرة وكفء للغاية؛ لذا نستخدمه فى إنتاج الضوء فى نبائط الثنائيات (الدايودات) الباعثة للضوء LED، وليزرات أشباه الموصلات المستخدمة فى اتصالات الألياف البصرية وطابعات الليزر ومشغلات ومسجلات الأقراص الضوئية وما شابه ذلك. لكن فى أشباه الموصلات المباشرة فإن الالتئام خلال مراكز R-G يكون هو الأسرع (والأكثر حدوثا) من الالتئام المباشر نطاق لنطاق. ونظرا لتلك الأهمية الشاملة لعمليات الالتئام فى مراكز R-G خصوصا فى شبه الموصل الأكثر أهمية أى السيليكون (تذكر أن السيليكون شبه منوصل غير مباشر) فإننا سنخصص الجزء القادم لهذا النوع من الالتئام فقط.

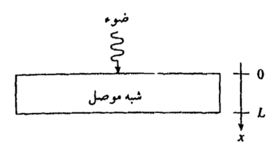
٣-٣-٣ إحصائيات R-G Statistics R-G

إحصائيات R-G هو الاسم الذى يطلق على التوصيف الرياضى لعمليات R-G. فى هذا التوصيف لن نطور علاقات لكثافة التيار كما فعلنا فى الانسياق والانتشار، فعمليات الالتئام - التوليد هى عمليات موضعية بطبيعتها. أى أنها تتم فى مواضع بعينها داخل بلورة شبه الموصل، وبالتالى لا تؤدى لانتقال الشحنة. الأكثر دقة أن نقول أن عمليات R-G تعمل على تغيير زمنى لتركيزات الحاملات عند موضع محدد، وبالتالى فالتوصيف الرياضى هنا يعنى حساب المعدلات الزمنية لتركيزات الحاملات أى $\frac{\partial p}{\partial t}$ و $\frac{\partial n}{\partial t}$.

سنبدأ بالتوليد الضوئى لبساطته ثم ننتقل لعمليات الالتئام - التوليد فى مراكز $R\text{-}G$ والتى سميناها عمليات الالتئام - التوليد الحرارية غير المباشرة.

التوليد الضوئى Photogeneration

نعلم أن الضوء الساقط على عينة شبه موصل كما بالشكل (٣-١٩) يُمتص منه جزء وينعكس الجزء الباقى على سطح المادة. فلو كان هذا الضوء أحادى الموجة أى أن له طولا موجيا محددا λ وترددا υ، وكانت طاقة الفوتون $h\upsilon$ أكبر من فجوة طاقة شبه الموصل E_g فإن هذا الفوتون سيمتص بواسطة شبه الموصل مولدا زوجا من إلكترون وشغرة. وبسبب امتصاص الضوء، تقل شدته I مع زيادة مسافة توغله x داخل المادة، أى أن:



شكل (٣-١٩) شبه الموصل، انتشار الضوء واتجاه الموضع x فى تحليل التوليد الضوئى
نفترض أن شبه الموصل سميك بحيث يمكن إهمال الانعكاس من السطح السفلى

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \qquad (3\text{-}26)$$

حيث تمثل I_0 شدة الضوء تحت السطح مباشرة أى عند $x = 0^+$ (0^+ تعنى يمين الصفر مباشرة)، و α معامل الامتصاص.

نجد من الشكل (٣-٢٠) أن α تعتمد بشدة على طول موجة الفوتون λ (حيث تزيد α بشدة عندما تقل عن λ_G) $\left(\lambda_G = \dfrac{c}{\upsilon_G} = \dfrac{hc}{E_g}\right)$.

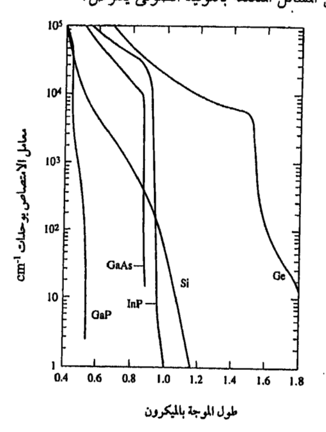
λ_G هو طول الموجة المناظر لفجوة الطاقة E_g. وعادة ما يعبر عن α بوحدات 1/cm. وبما أن أى امتصاص لفوتون يقابله توليد لزوج إلكترون - شغرة؛ لذا فإن معدل توليد هذه الأزواج $G_L(x, \lambda)$ يكون متناسبا أيضا مع $e^{-\alpha x}$، حيث G هو أول حرف فى كلمة توليد Generation. و L فى G_L ترمز للضوء Light، إذن يمكننا أن نستنتج أن :

$$\frac{\partial n}{\partial t}\Big|_{light} = \frac{\partial p}{\partial t}\Big|_{light} = G_L(x, \lambda) \qquad (3\text{-}27)$$

وتكون $G_L(x, \lambda)$ فى الوضع الذى تتعرض له هى :

$$G_L(x, \lambda) = G_{LO}\ e^{-\alpha x} \quad (3\text{-}28)$$

حيث G_{LO} هو معدل التوليد الضوئى عند $x = 0^+$ معبرا عنه بوحدات عدد لكل cm^3 لكل ثانية $(cm^{-3}.sec^{-1})$ الفاصل الرأسى $|_{light}$ بعد التفاضل الزمنى الجزئى $\frac{\partial n}{\partial t}$ أو $\frac{\partial p}{\partial t}$ وُضع ليميز معدل التوليد الناتج عن امتصاص الضوء عن غيره من عمليات التوليد الأخرى. فى المسائل المتعلقة بالتوليد الضوئى يفترض:



شكل (٣-٢٠) تغير معامل الامتصاص مع طول موجة الضوء فى السيليكون وعدد من أشباه الموصلات الأخرى

أولا: أن الإضاءة (وبالتالى معدل التوليد الضوئى) منتظمة داخل العينة أى لا تعتمد على موضع النقطة: $G_L(x, \lambda)=G_{LO}$ ويصلح هذا التبسيط إذا كان عمق العينة أقل بكثير من $1/\alpha$.

ثانيا: فى حالة زيادة عمق العينة كثيرا عن $1/\alpha$، حيث يكون الضوء قد امتص

بالكامل فى طبقة رقيقة جـدا قرب سطح شبه الموصل. ونلاحظ من المعادلة (3-28) أنه عند العمق $1/\alpha$ يكون قد امتص من الضوء نسبة قدرها $1-1/e$ أى حوالى 63% ويتبقى فقط 37%، وبالتالى فعند $1/\alpha << x$ يكون الضوء قد امتص كله، أما عند $x << 1/\alpha$ يكون قـد امتص من الضوء الـنذر القليل. وكمـثال عندمـا يكون الضوء بطول مـوجة $\lambda=0.4\mu m$ ساقـط على السيليكون تصـبح $\alpha = 10^5\ cm^{-1}$ (انظر الشكل ٣-٢٠) ومن ثم، فإن أى عـينة سيلـيكون بسمك أكـبر من ميـكرون واحد $(1/\alpha=0.1\ \mu m)$ يصبح التبسيط الثانى الخاص بالامتصاص الكلى عند السطح مناسبا جدا.

الالتئام - التوليد الحرارى غير المباشر

لاعتـبارات خـاصة بمستـوى الكتاب لن نتـعرض هنا بالتـفصـيل للحالة العـامة لإحصائيات الالتئام - التوليد. وفي نفس الوقـت فإن المعادلة التى تعبر عن حالة خاصة والتى سنذكرها هنا، تصلح لتـحليل بعض المسائل العملية. أى أننا سنـتناول فقط حالة خاصة لتجنب التعقيد الرياضى ولكنها ستعطينا فكرة جيدة عن الموضوع. وستبدأ بإعطاء تعريفات دقيقة لتركيزات الحاملات ومراكز $R\text{-}G$ التى نحتاجها فى هذا السياق.

n_o ، p_o . . . . تركيزات الحـاملات بالمادة موضوع التـحليل عندما تسود ظروف الاتزان.

n ، p . تركيزات الحاملات تحت أى ظروف.

$\Delta n = n - n_o$ ، $\Delta p = p - p_o$ تعـبر عن انحـرافات التركـيزات عن قـيم الاتزان ويجوز أن تكون موجبـة فى حالة الزيادة أو سالبة فى حالة النقصان.

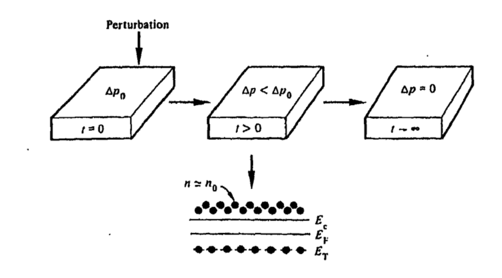
N_T عدد مراكز $R\text{-}G$ لكل cm^3.

وما نعنيـه بالحالة الخاصـة هو افتراض أن الانحـرافات Δn ، Δp تكون صغـيرة بالنسبة لتركيزات الأغلبية، وتسمى هذه الحالة بحالة الحقن المنخفض المستوى low-level injection، وهو ما يعنى أن القلقلة صغيرة نسبيا أو بدقة أكثر :

الحقن المنخفض المستوى يعرف بالآتى :	
فى المادة من النوع n	$\Delta p << n_o \;,\; n \approx n_o$
فى المادة من النوع p	$\Delta n << p_o \;,\; p \approx p_o$

لنأخذ المثال الآتى : سيليكون فى درجة حرارة الغرفة ومشاب بمانحات $N_D=10^{14}/cm^3$ تعرض لقلقلة أنتجت $\Delta p = \Delta n = 10^9/cm^3$ (أى $10^9/cm^3$ زوج إلكترون - شغرة). إذن لهذه المادة $n_o \approx N_D=10^{14}/cm^3$ و $p_o \approx n_i^2/N_D \approx 10^6/cm^3$. بالتالى $n = n_o + \Delta n \approx n_o$ و $p = 10^9/cm^3 << n_o = 10^{14}/cm^3$. واضح أننا إزاء حالة حقن منخفض. لاحظ أن $\Delta p >> p_o$. وعلى العكس من تعداد الأغلبية الذى يظل أساسا كما هو فى حالة الحقن المنخفض فإن تعداد الأقلية يتزايد بعدة رتب من المقدار. (زيادة رتبة مقدار تعنى عملية ضرب فى عشرة، رتبتين مقدار يعنى الضرب فى مائة، ثلاث رتب مقدار تعنى الضرب فى ألف، وهكذا. . .).

والآن نحن على استعداد لتحليل وضع خاص كالموضح فى الشكل (٣-٢١)، حيث تسببت قلقلة عند $t = 0$ فى إحداث زيادة فى تركيز الشواغر $\Delta p << n_o$ فى عينة سيليكون من النوع n. وعند $t > 0$ نفرض أن النظام سيسترخى ليعود لحالته الأولى مستخدما فى ذلك تفاعلات مراكز R-G. ما هى العوامل التى ستؤثر فى معدل $\frac{\partial p}{\partial t}\Big|_R$؟ [نضع الحرف R هنا لنتذكر أنفسنا أننا نحسب معدل التناقص $\frac{\partial p}{\partial t}$ فى تركيز الشغرات بسبب عمليات الالتئام عبر مراكز R-G]. لكى نفنى شغرة يلزم انتقالها من نطاق التكافؤ لمركز R-G مشغول بإلكترون. ومنطقيا أن نفترض أنه كلما زادت مراكز R-G المشغولة بإلكترونات زاد معدل فناء الشغرات، وبالتالى يزداد معدل الالتئام. وفى ظروف الاتزان تكون كل مراكز R-G الموضحة بالشكل (٣-٢١) مشغولة بإلكترونات. لماذا؟؛ لأن



شكل (٣-٢١) الوضع داخل شبه موصل من النوع n بعد قلقلة سببت زيادة شواغر بحقن منخفض المستوى

مستوى فرمى E_F أعلى من المستوى E_T لمراكز $R\text{-}G$ وفى ظل وجود حالة حقن منخفض المستوى ($\Delta p << n_o$) فإن عدد الإلكترونات يفوق بكثير عدد الشغرات، وبالتالى تشغل الإلكترونات أولا بأول أية مراكز $R\text{-}G$ خالية؛ لذا يمكننا القول أن عدد مراكز $R\text{-}G$ المشغولة يساوى تقريبا عدد المراكز $R\text{-}G$ الذى يساوى N_T. وبذا نتوقع أن تتناسب $\frac{\partial p}{\partial t}\big|_R$ مع N_T تقريبا. ومن المنطقى أيضا أن نقول أن معدل فناء الشغرات يتناسب مع عددها أيضا. بالتالى $\frac{\partial p}{\partial t}\big|_R \propto N_T p$. وأخيرا $\frac{\partial p}{\partial t}\big|_R$ يجب أن يكون سالبا؛ لأنه يعبر عن فناء (تناقص).

إذن نستنتج أن :

$$\frac{\partial p}{\partial t}\bigg|_R = - c_p N_T p \qquad (3\text{-}29)$$

حيث c_p هو مجرد ثابت تناسب بين $\frac{\partial p}{\partial t}\big|_R$ وحاصل الضرب $N_T p$.

ما حسبناه فى (3-29) هو معدل الالتئام، لكن عمليات الالتئام تتعايش طوال الوقت مع عمليات التوليد، وبالتالى لا بد أيضا من حساب معدل توليد الشغرات $\frac{\partial p}{\partial t}\big|_G$. التوليد يتطلب وجود إلكترونات فى نطاق التكافؤ ومستويات خالية بنطاق التوصيل وهذه متوافرة طوال الوقت. العامل المحدد فقط هو وجود الوسطاء من مراكز $R\text{-}G$ الخالية من الإلكترونات لتكون همزة الوصل لانتقال إلكترون من نطاق التكافؤ للتوصيل. لكن عدد مراكز $R\text{-}G$ الخالية لا يتغير عندما يكون الحقن منخفض المستوى (سنثبت ذلك بعد قليل)، وبالتالى $\frac{\partial p}{\partial t}\big|_G$ لا يتغير عن قيمته عند الاتزان $\frac{\partial p}{\partial t}\big|_{G_0}$ (G_0 ترمز للاتزان). ولكن عند الاتزان لا بد أن يتساوى معدلا الالتئام والتوليد أى أن:

$$\frac{\partial p}{\partial t}\bigg|_{G_0} - c_p N_T p_o = 0$$

$$\therefore$$

$$\frac{\partial p}{\partial t}\bigg|_{G_0} = c_p N_T p_o \qquad (3\text{-}30)$$

بالتالى يكون معدل تغير تركيز الشغرات نتيجة تفاعلات مراكز $R\text{-}G$ هو :

$$\frac{\partial p}{\partial t}\bigg|_{\substack{\text{i-thermal}\\ R\text{-}G}} = \frac{\partial p}{\partial t}\bigg|_R + \frac{\partial p}{\partial t}\bigg|_G$$

$$= - c_p N_T (p - p_o) \qquad (3\text{-}31)$$

أى أن :

$$\frac{\partial p}{\partial t}\bigg|_{\substack{\text{i-thermal}\\ R\text{-}G}} = -\,c_p\,N_T\,\Delta p \qquad (n \text{ مادة من النوع}) \qquad (3\text{-}32\text{-}a)$$

وبالمثل :

$$\frac{\partial n}{\partial t}\bigg|_{\substack{\text{i-thermal}\\ R\text{-}G}} = -\,c_n\,N_T\,\Delta n \qquad (p \text{ مادة من النوع}) \qquad (3\text{-}32\text{-}b)$$

حيث c_p، c_n ثوابت موجبة وتسمى معاملات الأسر (أو الاصطياد).

قبل أن نمضى قُدما علينا أولا تفسير عدم تغير عدد المراكز R-G غير المشغولة حال حدوث حقن منخفض المستوى. إحصائيا يتحدد هذا العدد بالفرق $E_F - E_T$ ولكن E_T ثابت وأيضا E_F لا يتغير فى حالة الحقن المنخفض المستوى؛ لأن الأخير لا يغير كثيرا فى عدد الحاملات الأغلبية، وهذه الأخيرة بدورها هى التى تحدد موضع E_F على أشكال النطاق.

إذن الحقن المنخفض المستوى لا يغير فى عدد مراكز R-G الخالية. ملاحظة أخرى. استعملنا المصطلح i-thermal بجانب $\frac{\partial p}{\partial t}$ و $\frac{\partial n}{\partial t}$ للدلالة على أننا هنا نحسب هذه المعدلات لحالات الالتئام - التوليد الحرارية غير المباشرة (أى تلك التى تسببها مراكز R-G) كلمة حرارية مرتبطة بالفونونات.

بالرغم من أن المعادلتين (3-32) تفيان بالغرض تماما، إلا أننا سنعيد كتابتهما فى صورة أكثر تعبيرا. بالنظر للطرف الأيسر بالمعادلتين (3-32) نجد أن الوحدة المستعملة هى وحدة تركيز / وحدة زمن، وبالتالى حاصل الضرب $c_p\,N_T$ أو $c_n\,N_T$ له وحدات مقلوب الزمن؛ لذا ندخل هنا الثابتين الزمنيين التاليين :

$$\tau_p = 1 / c_p\,N_T \qquad (3\text{-}33\text{-}a)$$

$$\tau_n = 1 / c_n\,N_T \qquad (3\text{-}33\text{-}b)$$

وبالتالى نعيد كتابة (3-32) فى الصورة :

$$\frac{\partial p}{\partial t}\bigg|_{\substack{\text{i-thermal}\\ R\text{-}G}} = -\,\frac{\Delta p}{\tau_p} \qquad (n \text{ مادة من النوع}) \qquad (3\text{-}34\text{-}a)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t}\bigg|_{\substack{\text{i-thermal}\\ R\text{-}G}} = -\,\frac{\Delta n}{\tau_n} \qquad (p \text{ مادة من النوع}) \qquad (3\text{-}34\text{-}b)$$

بالوصول للمعادلتين (3-34) نكون قد قمنا بالتـوصيف الرياضى المطلوب للحالة الخاصة: الالتئام – التوليد عن طريق مراكز R-G (أى الحرارية غير المباشرة) فى ظروف الحقن المنخفض المستوى. وبالرغم من الافتراض الضمنى أن العمليات الحادثة تتغير ببطء عند اشتقاق المعادلتين (3-34) لكن يمكن استخدام نفس المعـادلات لمعظم حالات التغير الفجائى **transient** دون وجود خطأ كبير.

لاحظ أيضا أنه حين تكون Δp سالبة فإن هذا سيؤدى إلى $\partial p/\partial t\,|_{\text{i-thermal R-G}} > 0$ أى إلى وجود توليد بمعدل أسرع من الالتـئام لتعويض النقص الحادث Δp. إذن الطرف الأيسر فى المعادلتين (3-34) يعبر عن مـحصلة عمليتى الالتـئام والتوليد الحـرارية غير المباشرة.

أيضا لا بد من إعادة التأكـيد على أن المعادلتين (3-34) ينطبقان فقـط على التغير فى تركيز الحـاملات الأقلية عند ظروف الحقن المنخفـض. وإذا أردنا التعامل مع كل من الحامـلات الأقلية والغالبيـة فى ظروف الحقن المنخفض أو العـالى المستوى فعلينا قـبول معـادلة أعقـد قليلا من المعـادلة (4-34) وهنا سنعطى هذه المعـادلة دون برهان. وعلى القارئ المهتم بالبرهان، النظر فى أحد المراجع المتقدمة والمعادلة العامة هى :

$$\frac{\partial p}{\partial t}\Big|_{\substack{\text{i-thermal}\\ \text{R-G}}} = \frac{\partial n}{\partial t}\Big|_{\substack{\text{i-thermal}\\ \text{R-G}}} = \frac{n_i^2 - np}{\tau_p\,(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \qquad (3\text{-}35)$$

حيث :

$$n_1 \equiv n_i \quad e^{(E_T - E_i)/kT} \qquad (3\text{-}36\text{-a})$$

$$p_1 \equiv n_i \quad e^{(E_i - E_T)/kT} \qquad (3\text{-}36\text{-b})$$

وسنترك للقارئ البرهنة على أن المعادلتين (3-35) تئول إلى المعادلتين (3-34) فى حالة الحقن المنخفض المستوى.

٣-٣-٤ أعمار الحاملات الأقلية Minority Carrier Lifetimes

معلومات عامة

عرفنا الثابتين τ_n و τ_p فى المعادلتين (3-34) دون تعليق لكن من الواضح أن لهما أهمية فى التعرف على مدى سرعة فعل الالتئام – التوليد.

لنعد مرة أخرى للشكل (٣-٢١) للتعرف على هذين الثابتين بصورة أفضل. عند $t = 0$ بدأنا بعدد مـعين من الشغرات. هذا العـدد لا يفنى كله دفعة واحـدة، فبعضـها

يتعرض للفناء المبكر، والبعض الآخر قد يبقى نسبيا لعمر أطول قبل الالتئام بإلكترون. وإذا كان الالتئام - التوليد الحراريين هما العمليتان الوحيدتان الموجودتان فيمكن عندئذ حساب متوسط عمر الشغرات بطريقة سهلة ومباشرة، وبدون الدخول فى التفاصيل فإن العمر المتوسط للشغرات سنجد أنه τ_p فى المادة من النوع n كما أن متوسط عمر الإلكترونات هو τ_n فى المادة من النوع p. وبالتالى يمكننا أن نعتبر كلا من τ_n أو τ_p متوسطا لعمر الحاملات الأقلية التى تعيش فى بحر من الحاملات الأغلبية. من الطبيعى أن نطلق على هذين الثابتين τ_n وτ_p أعمار الحاملات الأقلية.

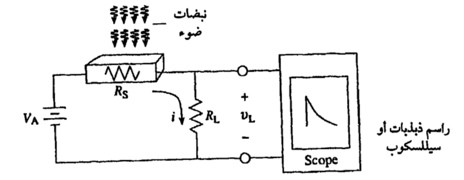
ومثل الثوابت D, μ يعتبر τ ثابتا هاما لتمييز وسائط (بارامترات) المواد التى لا بد من معرفتها أثناء نمذجة النبائط. لكن خلافا للثوابت μ و D فلا توجد سوى منحنيات وجداول قليلة تسجل قيم τ التى تُستخدم لزوم نمذجة نبيطة ما. فى الحقيقة لا بد من إجراء قياسات معملية -سيجىء ذكرها- لتحديد عمر الحاملات الأقلية لعينة معطاة من شبه الموصل. والسبب فى عدم توفر هذه الجداول أو المنحنيات يمكن نسبته للتغاير الكبير للوسائط τ_n و τ_p. فكما رأينا فى المعادلتين (33-3) فإن هذين الوسيطين يرتبطان ارتباطا وثيقا بعدد المراكز R-G (N_T) وللأسف فإن إمكانية التحكم فى دقة قيمة (N_T) أثناء تصنيع شبه الموصل تعتبر أقل بكثير بالقياس مثلا بإمكانية التحكم فى تركيزات الإشابة (N_D أو N_T). وليست المشكلة فقط فى دقة N_T ولكن فى طبيعة عمل المراكز R-G المهيمنة على الالتئام التوليد حيث يمكن أن تتغير من موضع إلى آخر داخل العينة المفردة أثناء تصنيع النبائط. توجد طريقة تصنيع تسمى بالاستئصال gettering تستطيع الإقلال من تركيز المراكز R-G لحدود دنيا مما يجعل الثابت الزمنى كبيرا جدا (حوالى ١ ميللى ثانية فى السيليكون) ومن ناحية أخرى يمكن بإدخال ذرات من الذهب بغرض زيادة مراكز R-G أن نصل بالثابت الزمنى إلى واحد نانوثانية. يقع عمر الحاملات الأقلية فى السيليكون عادة بين هاتين القيمتين أى:

$$10^{-9}\,\text{sec} < \tau < 10^{-3}\,\text{sec}$$

قياس العمر:

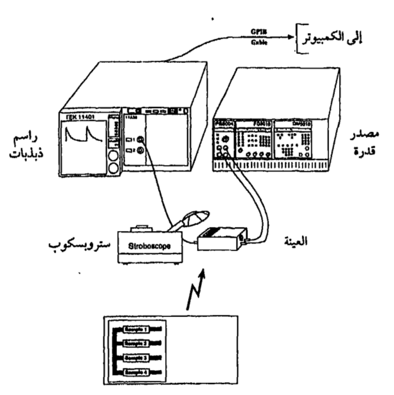
يمكن استخدام طرق متعددة لقياس الثابت الزمنى. فى غالبية هذه الطرق تقاس مميزات تركيبات أو نبائط معينة وبمقارنة المميزات المقاسة بتلك المحسوبة نظريا يمكن الحصول على عمر الحاملة. الطريقة التى نوردها هنا تستعمل عينة من شبه الموصل على شكل قضيب مع نقاط تلامس أومية عند طرفيه. إذا تلامس معدن مع شبه الموصل غالبا ما نحصل على نقطة تلامس غير أومية أى علاقة الجهد والتيار تختلف باختلاف اتجاه التيار. وللتغلب على هذه المشكلة نزيد الإشابة بدرجة كبيرة (أى تضاف كثير من

المانحات لشبه الموصل من النوع n أو كثير من المتقبلات للنوع p) لشبه الموصل عند نقاط تلامسه مـع المعدن فنحصل على نقطة تلامـس أومـية. يتم توصيـل العينة كـما بالشكل (٣-٢٢).



شكل (٣-٢٢) مخطط لتوضيح قياس اضمحلال التوصيلية الضوئية باستخدام راسم الذبذبات الكهربى (CRO)

وتسمى هذه الطريقة بطريقـة التوصيل الضوئى وفيها يتم تعـريض العينة لنبضات من الضوء، ناتجـة عن جهاز سـتروبسكوب انظر الشكل (٣-٢٣) كل نبضـة ضوء تنتج زيادة فى الحامـلات. وما إن تنتهى نبضـة الضوء يعمل الالتـئام على إزالة هذه الزيادة،



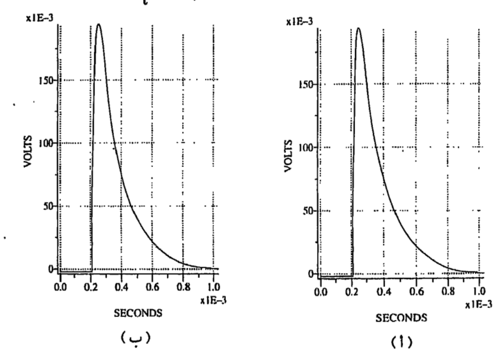
شكل (٣-٢٣) نظام قياس اضمحلال الموصلية الضوئية باستخدام كمبيوتر

وحيث إن التوصيلية الكهربية تتناسب مع عدد الحاملات، فإنها تتغير مع الزمن. ومن تغير التوصيلية يمكن استنباط قيمة τ باستخدام راسم الذبذبات الكهربى (CRO)، شكل (٣-٢٢) وفى الأجهزة التجارية باستخدام كمبيوتر، الشكل (٣-٢٣).

فى الشكل (٣-٢٢) R_s هى مقاومة العينة و R_L هى مقاومة الحمل، الجهد V_A هو جهد مستمر على كل من R_s و R_L بينما V_L هو الجهد العابر (transient) على مقاومة الحمل. وبدون الدخول فى تفاصيل القياس سنجد أنه فى حالة الحقن المنخفض المستوى أن V_L عبارة عن جزئين :

$$V_L = V_{DC} + V_{AC}\, e^{-t/\tau_p} \qquad (3\text{-}37)$$

الجزء V_{DC} هو الجزء المستمر المناظر للظلام المستمر، V_{AC} هو أقصى تغير عابر بعد بدء نبضة ضوء جديدة و τ هو عمر الحاملات الأقلية لشبه الموصل. بإدخال V_L على راسم ذبذبات كهربى أو كمبيوتر يمكن تحديد τ الشكل (٣-٢٤ أ) يوضح التغير مع الزمن للجزء العابر بتدريج رأسى خطى بينما الشكل (٣-٢٤ ب) بتدريج رأسى لوغاريتمى، وهذا الشكل الأخير مناسب تماما للتغير العابر من النوع المشار إليه فى المعادلة (3-37)، إذ إن الجزء النازل تقريبا خط مستقيم ميله $-\frac{1}{\tau}$ مباشرة.



شكل (٣-٢٤) رد الفعل العابر للتوصيلية الضوئي. الجزء المتغير مع الزمن لفرق الجهد V_L (بالميللى فولت) مرسوم على المحور الرأسى كدالة للزمن (بالميللى ثانية) على المحور الأفقى
أ - تمثيل بيانى خطى، ب- تمثيل بيانى نصف لوغاريتمى

(٣-٤) معادلات الحالة Equations of State

فى الأقسام الثلاثة الأولى من هذا الفصل تفحصنا ثلاثة أنواع منفصلة من فاعليات الحاملات وقمنا بنمذجتها كل على حدة. لكن فى شبه الموصل الحقيقى تحدث هذه الفاعليات فى آن واحد، ولكى نتعرف على حالة شبه الموصل يجب أن نأخذ فى الحسبان التأثير المركب لكل هذه الفاعليات المنفردة. وعندما تأخذ كل الاعتبارات معا فإننا نحصل على مجموعة أساسية من المعادلات الأولية نبدأ بها عند حل مسائل النبائط. سنسمى هذه المعادلات بمعادلات الحالة. فى هذا القسم سنبدأ باستنباط معادلات الحالة هذه. وفى باقى هذا القسم سنوجز بعض التبسيطات الشائعة وقائمة بحلول حالات خاصة وأمثلة.

٣-٤-١ معادلات الاتصال Continuity Equations

جميع فاعليات الحاملات من انسياق، انتشار، التئام - توليد مباشر أو غير مباشر، أو أى نوع آخر من الفاعليات، لا بد وأن تؤدى جميعها إلى تغيير فى تركيز الحاملات مع الزمن. ومجموع كل معدلات التغير الزمنى للفاعليات المنفصلة يعطى المعدل الكلى $\frac{\partial n}{\partial t}$ و $\frac{\partial p}{\partial t}$.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial t}\Big|_{\text{drift}} + \frac{\partial n}{\partial t}\Big|_{\text{diff}} + \frac{\partial n}{\partial t}\Big|_{\substack{\text{thermal.}\\ \text{R-G}}} + \frac{\partial n}{\partial t}\Big|_{\text{other}} \qquad \text{(3-38-a)}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t}\Big|_{\text{drift}} + \frac{\partial p}{\partial t}\Big|_{\text{diff}} + \frac{\partial p}{\partial t}\Big|_{\substack{\text{thermal}\\ \text{R-G}}} + \frac{\partial p}{\partial t}\Big|_{\text{other}} \qquad \text{(3-38-b)}$$

حيث الطرف الأيسر يعبر عن معدل التغير الإجمالى، باقى الرموز واضحة وكلمة other تشير لباقى عمليات الالتئام - التوليد ما عدا الحرارية $R\text{-}G$ أى مثل تلك الناجمة عن الضوء وخلافه.

لنبدأ ببحث معدلات التغير فى تركيز الحاملات الناجمة عن التغير الموضعى فى تيارى الانسياق والانتشار.

نفترض وجود تيار اصطلاحى فى الاتجاه الموجب $x+$ ودعونا نراقب ماذا يحدث لعدد الشغرات المتواجدة بين وجهى شريحة مساحة مقطعها A، وطرفاها عند الموضعين x، $x + \Delta x$ ومتعامدان على اتجاه التيار. وسنفترض أن تغير التركيز ناتج فقط عن تغير التيار مع الموضع خلال فترة زمنية مقدارها Δt.

عدد الشغرات التى تدخل عند x هى $A\, J_p\,(x)\,\Delta t/q$، وعدد الشغرات التى

تخرج عند $x + \Delta x$ هى $A J_p (x+\Delta x) \Delta t/q$، ونظرا لأن هذين العددين غير متساويين بصفة عامـة فسيحدث تغير فى عـدد الشغرات مقداره (التغيـر فى التركيز Δp) مضروبا فى(الحجم $A \Delta x$) أى بمقدار $A \Delta x \Delta p$. وبما أن :

التغير = العدد الداخل - العدد الخارج ، إذن :

$$A \Delta x \Delta p = \frac{\Delta J_p (x) \Delta t}{q} - \frac{\Delta J_p (x+\Delta x) \Delta t}{q} \qquad (3\text{-}39)$$

أو

$$\frac{1}{q} \frac{J_p (x+\Delta x) - J_p(x)}{\Delta x} - \frac{\Delta p}{\Delta t} = 0 \qquad (3\text{-}40)$$

وعندما تؤول Δx ، Δt للصفر نجد أن :

$$\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \qquad (3\text{-}41)$$

طبعا لجأنا للتفاضلات الجزئية لأن الكميات p، j هنا دالة فى المتغـيرين المسـتقلين x وt أى أن :

$$p \equiv p(x,y) \qquad , J \equiv J(x,y) \qquad (3\text{-}42\text{-}a)$$

فى الحقيقـة يجب أن نعمم الموضع من البعـد الأحـادى (x) إلى الأبعـاد الثـلاثة (x, y, z) ، وبالتالى:

$$p \equiv p(x, y, z, t) \quad , J_p \equiv J_p (x, y, z, t) \qquad (3\text{-}42\text{-}b)$$

$$\frac{\partial J_p}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial J_p}{\partial x} + \frac{\partial J_p}{\partial y} + \frac{\partial J_p}{\partial z} = \nabla . J_p \qquad (3\text{-}43)$$

$\frac{\partial p}{\partial t}$ هنا هى نتاج $\frac{\partial p}{\partial t}$ للانسياق والانتشار معا أى :

$$\frac{\partial p}{\partial t}\Big|_{drift} + \frac{\partial p}{\partial t}\Big|_{diff} = -\frac{1}{q}\nabla . J_p \qquad (3\text{-}44)$$

طبعا عندما يكون الاتجاه الاصطلاحى موجبا فإن دخول الإلكترونات سيكون من الوجه $x+\Delta x$ وستخـرج من الوجه الذى عند x بسبب شحنة الإلكتـرون السالبة وتكون النتيجة مشابهة للمعادلة (3-44) بعد إزالة إشارة السالب، أى :

$$\frac{\partial n}{\partial t}\Big|_{drift} + \frac{\partial n}{\partial t}\Big|_{diff} = \frac{1}{q}\nabla . J_N \qquad (3\text{-}45)$$

من المعادلات (3-38)، (3-44)، (3-45) نصل إلى :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q}\nabla . J_N + \frac{\partial n}{\partial t}\Big|_{\substack{thermal\\R\text{-}G}} + \frac{\partial n}{\partial t}\Big|_{other} \qquad (3\text{-}46\text{-}a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q}\nabla . J_p + \frac{\partial p}{\partial t}\Big|_{\substack{thermal\\R\text{-}G}} + \frac{\partial p}{\partial t}\Big|_{other} \qquad (3\text{-}46\text{-}b)$$

معادلتا الاتصال (3-46) تعتبر عامة تماما وتؤخذ كما هى أو فى شكل غير مباشر كنقطة البداية عند تحليل عمل معظم النبائط. فى الحالات التى يتم حل معادلتى الاتصال بالطريق العددية باستخدام الكمبيوتر تؤخذ المعادلات (4-46) كما هى بعد التعويض عن الحـدود $\partial n/\partial t|_{thermal\ R\text{-}G}$ و $\partial p/\partial t|_{thermal\ R\text{-}G}$ بواسطة المعـادلات (3-34) [أو غـالبـا بمعـادلات أعم من المعـادلات (3-34)]. وتحـسب الدوال $p(x, y, z, t)$ و $n(x, y, z, t)$ عـدديا. أما إذا أردنا حـلولا غيـر عـددية أى فى صورة تـعبيـرات رياضيـة مكتـملة closed-form فعـادة ما تستخـدم صورة مبسطـة من معادلتى الاتصال وهذا مـا سوف نفصله فى الجزء التالى.

٣-٤-٢ معادلات انتشار الحاملات الأقلية

Minority Carrier Diffusion Equations

كما أشـرنا قبل قليل إذا كان المطلوب هو حلول تحليلية مكتـملة فإن عبء العمل سيـقع على معـادلات تسمى بمعـادلات انتشار حـاملات الأقليـة. ويمكن اشتـقاق هذه المعادلات من معادلات الاتصال عن طريق اتباع الافتراضات التبسيطية التالية:

١- يتم اختزال الثلاثة أبعاد إلى بعد واحد: «x» مثلا.

٢- يقتصر التحليل على الحاملات الأقلية فقط.

٣- المجال الكهربى صغير بحيث يمكن إهماله : $\mathcal{E} \approx 0$.

٤- تركـيـزات الاتزان ليـست دالة فى الموضـع أى أنهـا ثابـتـة n_o=const، p_o=const.

٥- تحقيق شرط الحقن منخفض المستوى.

٦- الالتئام - التوليد الحرارى غير المباشر هو المهيمن.

٧- عمليات الالتـئام - التوليد المشار إليـها بكلمة other غير موجـودة باستثناء التوليد الضوئى.

وتؤدى بنا قائمة الافتراضات السابقة إلى سلسلة من التبسيطات لمعادلات الاتصال.

فأولا اختزال الأمور إلى بعد واحد يؤدى إلى:

$$\frac{1}{q} \nabla . J_N \quad \rightarrow \quad \frac{1}{q} \quad \frac{\partial J_N}{\partial x} \tag{3-47}$$

كذلك إهمال المجـال الكهربى يجعل الانسيـاق قليل الأهمية بالنسبـة للحاملات الأقلية (مثلا n صغيرة فى مادة من النوع p).

$$J_N = q\mu_n n\mathcal{E} + q D_N \frac{\partial n}{\partial x} \approx q D_N \frac{\partial n}{\partial x} \tag{3-48}$$

أهملنا حد الانسيـاق الذى يحتوى على $n\mathcal{E}$ ؛ لأن $\mathcal{E} \approx 0$، وكذلك n مهملة لكونهـا تركيـز الأقلية (لهـذا افترضنـا التبسـيط رقم 2 فى القـائمة السابـقة)، وبما أن n_o=const (تبسيط رقم ٤)، وحيث إن $n = n_o + \Delta n$ إذن :

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{\partial n_o}{\partial x} + \frac{\partial \Delta n}{\partial x} = \frac{\partial \Delta n}{\partial x} \tag{3-49}$$

بدمج المعادلتين (3-47)، و(3-49) نحصل على :

$$\frac{1}{q} \nabla . J_N \quad \rightarrow \quad D_N \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} \tag{3-50}$$

بالنسبة لباقى حدود معادلة الاتصال للإلكترونات وعملا بالافتراض (٦) أى هيمنة عملية الالتئام - التوليد عن طريق المراكز R-G على باقى العمليات وأخذ بالافتراض (٥)، وهو تحقيق الحقن المنخفض المستوى نصل إلى:

$$\frac{\partial n}{\partial t}\bigg|_{\substack{\text{thermal}\\ R\text{-}G}} = -\frac{\Delta n}{\tau_n} \tag{3-51}$$

ومن الفرض (٧) فإن :

$$\frac{\partial n}{\partial t}\bigg|_{\text{other}} = G_L \tag{3-52}$$

وطبعا $G_L=0$ إذا لم يتعرض شبه الموصل للضوء، وأخيرا بالنسبة للحد $\frac{\partial n}{\partial t}$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial\,(n_o+\Delta n)}{\partial t} = \frac{\partial \Delta n}{\partial t} \tag{3-53}$$

بالتعويض من المعادلات (3-50) حتى (3-53) فى معادلة الاتصال (3-46-a) نحصل على :

معادلات انتشار حاملات الأقلية

$$\frac{\partial\,\Delta n_p}{\partial t} = D_N\,\frac{\partial^2\,\Delta n_p}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_p}{\tau_n} + G_L \tag{3-54-a}$$

$$\frac{\partial\,\Delta p_n}{\partial t} = D_P\,\frac{\partial^2\,\Delta p_n}{\partial x^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p} + G_L \tag{3-54-b}$$

وضعنا الدليل السفلى فى رموز التركيزات (n_p ، p_n) لنذكر أنفسنا أننا هنا نتعامل فقط مع الحاملات الأقلية أى الإلكترونات فى المواد من النوع p والشغرات فى المواد من النوع n.

٣-٤-٣ حالات خاصة - تبسيطات - حلول

عند إجراء تحليل للنبيطة نجد أن ظروف المسألة تسمح بتبسيطات إضافية تجعل إيجاد الحلول لمعادلة انتشار حاملات الأقلية أمرا ميسورا. فى الجدول التالى نذكر بعض التبسيطات الشائعة ونتائجها.

جدول (٣-١)

النتيجـــة	التبســيط
$\frac{\partial \Delta n_p}{\partial t} \to 0 \quad \left(\frac{\partial \Delta p_n}{\partial t} \to 0 \right)$	حالة الاستقرار
$D_N \frac{\partial^2 \Delta n_p}{\partial x^2} \to 0 \quad \left(D_p \frac{\partial^2 \Delta p_n}{\partial x^2} \to 0 \right)$	عدم تغير التركيزات مع الموضع أو عدم وجوذ انتشار
لا جديد فهذا أحد افتراضات معادلة انتشار الأقلية	عدم وجود انسياق أو مجال كهربى $\mathcal{E} = 0$
$\frac{\Delta n_p}{\tau_n} \to 0 \quad \left(\frac{\Delta p_n}{\tau_p} \to 0 \right)$	إهمال الالتئام - التوليد الحرارى $R\text{-}G$
$G_L \to 0$	عدم وجود ضوء

وبعد كـتابة معادلة انتـشار الأقليات التى تم تبسـيطها باستـخدام جدول (٣-١) نكتب الحلول مستعينين بالجدول (٣-٢) الثابتان A، B يتحددان من ظروف المسألة.

جدول (٣-٢)

م	معطيات	المعادلة المبسطة	الحـــل $\Delta n_p =$
١	حالة الاستقرار ولا يوجد ضوء	$D_N \frac{d^2 \Delta n_p}{dx^2} - \frac{\Delta n_p}{\tau_n} = 0$	$\Delta n_p = A\, e^{-x/L_n} + B\, e^{x/L_n}$ حيث: $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$
٢	التركيز منتظم ولا يوجد ضوء	$\frac{d\, \Delta n_p}{dt} = -\frac{\Delta n_p}{\tau_n}$	$\Delta n_p(0)\, e^{-t/\tau_n}$
٣	حالة الاستقرار ولا يوجد ضوء	$-\frac{\Delta n_p}{\tau_n} + G_L = 0$	$G_L \tau_n$

تابع جدول (٣-٢)

م	معطيات	المعادلة المبسطة	الحـــل $\Delta n_p =$
٤	حالة مستقرة ولا يوجد ضوء	$D_n \dfrac{d^2 \Delta n_p}{dx^2} = 0$ أى : $\dfrac{d^2 \Delta n_p}{dx^2} = 0$	$A + Bx$

فى جدول (٣-٢) الثابت $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ يسمى طول الانتـشار ولأهميـته سنتكلم عنه لاحقا.

الكمـية $\Delta n_p(0)$ هى الزيادة فى عدد الإلكـترونات عند الزمن $t = 0$، لاحظ أن هذا الجدول اختص بالإلكتـرونات فى مادة من النوع p، أما بالنسبة لـلشغرات فى مادة من النوع n فنستخدم نفس الجدول (٣-٢) بعد تغيير كل من n إلى p وكل p إلى n.

٣-٤-٤ حل المسائل Problem Solving

يعتبر كل تحليل لعـمل النبائط مثالا على استخدام الجـدولين السابقين. وسنكتفى هنا بمثالين شائعين. وهذان المثالان سيمهدان الطريق لعرض مفهومين هامين نتعرض لهما فى نهاية الفصل.

مثال ٣-٤ :

رقاقة سيليكون مشـابة بانتظـام بتركـيز شـوائب $N_D = 10^{15}/cm^3$ ودرجة الحرارة $T = 300$ K. عند الزمن $t = 0$ تعرضت الرقاقة لـضوء مفاجئ ولّد 10^{17} زوج إلكترون - شـغرة لكـل cm^3 لكـل ثانيـة. فـإذا كـان عـمـر الأقـلية $\tau_p = 10^{-6}$ sec عين $\Delta p_n(t)$ للزمن $t > 0$.

الحل :

الخطوة (١) :

راجع بدقة معطيات المسألة ومضامينها :

شبه الموصل هو الســيليكون، $T = 300$ K، الإشـابة منتظمـة $N_D = 10^{15}/cm^3$،

و G_L=10^{17} / cm^3-sec بانتظام لكل النقط داخل شبه الموصل. أيضا صيغة المسألة تتضمن حالة اتزان عند $t < 0$.

الخطوة (٢) :

حدد بيانات النظام فى حالة الاتزان :

فى السيليكون عند درجة حرارة الغرفة $n_i = 10^{10}/cm^3$، وبما أن $N_D >> n_i$

$\therefore$ $n_o = N_D = 10^{15} / cm^3$، وأيضا : $p_o = n_i^2 / N_D = 10^5 / cm^3$.

الإشابة المنتظمة تعنى أن n_o و p_o لا يتغيران مع الموضع.

الخطوة (٣) :

حلّل المسألة كيفيا :

* قبل $t < 0$ كان النظام متزنا : $\Delta p_n = 0$.

* عند $t = 0$ يولد الضوء المستمر المزيد والمزيد من الإلكترونات والشغرات. أما الإلكترونات فليست من الأهمية بمكان؛ لأنها الأغلبية (تركيز الأغلبية لا يتغير كثيرا بالحقن المنخفض المستوى).

* وينصب تركيزنا على الشغرات، التى تبدو أنها ستزيد باطراد مع الزمن بسبب التوليد الضوئى. إلا أن معدل التغير $\frac{\partial \Delta p_n}{dt}$ سيتناقص بسبب الالتئام الذى يتناسب مع Δp_n نفسها. وسنصل إلى نقطة حيث ستتوقف Δp_n عن النمو عندما يتساوى معدل التوليد الضوئى G_L مع معدل الالتئام $\frac{\Delta p_n}{\tau_p}$ وسنصل إلى أعلى قيمة $\Delta p_{n\,max} = \tau_p G_L$.

الخطوة (٤) :

حلّل المسألة كَميا:

عادة ما نبدأ من معادلة انتشار الحاملات الأقلية. بعد التأكد من عدم وجود ظروف تتعارض مع فرضيات هذه المعادلة نشرع فى كتابتها.

نبسط المعادلة (انظر بالجدول ٣-١) ثم نكتب الحلول كالموضحة بالجدول (٣-٢).

بفحص سريع للمسألة التى بين أيدينا نتبين أن الشروط التى تفترضها معادلة الانتشار متحققة هنا. بالتحديد فإننا سنقتصر على الحاملات الأقلية، تركيزات الاتزان للحاملات لا تعتمد على الموضع، الالتئام - التوليد من النوع الحرارى R-G هو السائد

فى السيليكون، ولا توجد عمليات توليد أخرى سوى التوليد الضوئى. وبما أن شدة الإضاءة منتظمة داخل العينة، بالتالى فإن الحاملات الإضافية المتولدة أيضا يكون لها تركيز منتظم أى لا يعتمد على الموضع داخل العينة. وبالتالى لن يوحد مجال كهربى مبيت وأخيرا أقصى تغيير فى تركيز الشغرات $\Delta p_{n/max} = G_L \tau_p = 10^{11} / cm^3 << n_o$ أى أن الحقن منخفض المستوى طوال الوقت.

فى ظل عدم وجود عوائق أمام استخدام معادلة الانتشار نستطيع أن نجد الحل الكمى بحل المعادلة :

$$\frac{\partial \Delta p_n}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 \Delta p_n}{\partial x^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p} + G_L \qquad (3\text{-}55)$$

بالشرط الابتدائى :

$$\Delta p_n(t)\big|_{t=0} = 0 \qquad (3\text{-}56)$$

وبما أن Δp_n لا تتغير مع الموضع، نسقط الحد $\frac{\partial^2 \Delta p_n}{\partial x^2}$ وتصبح معادلة الانتشار :

$$\frac{d\,\Delta p_n}{dt} + \frac{\Delta p_n}{\tau_p} = G_L \qquad (3\text{-}57)$$

حل المعادلة (3-57) هو :

$$\Delta p_n(t) = G_L \tau_p + A\, e^{-t/\tau_p} \qquad (3\text{-}58)$$

من الشرط الابتدائى : $\Delta p_n(0) = 0$ ينتج أن :

$$A = -G_L \tau_p \qquad (3\text{-}59)$$

وبالتالى الحل المطلوب :

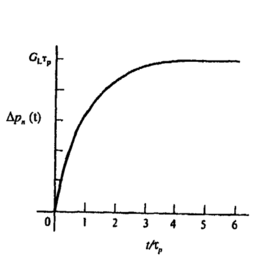
$$\Delta p_n(t) = G_L \tau_p \left(1 - e^{-t/\tau_p}\right) \qquad (3\text{-}60)$$

الخطوة (٥) :

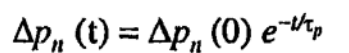
افحص الحل :

عدم تفحص الحل يبدو كمن تكبد المشقـة لزراعة صنف من الفاكهة ثم لم يتذوق ثمار ما زرعه. بما أن وحدات $G_L \tau_p$ هى cm^{-3} إذن الحل سليم من ناحية الأبعاد على الأقل. إذا رسم $\Delta p_n(t)$ كـدالة فى الزمن t (انظر الشكل 25) نجـد أن $\Delta p_n(t)$ يرتفع سريعا فى البداية ثم لا يلبث أن يتشبع للقيمة $G_L \tau_p$ عندما يئول الزمن لما لا نهاية. فى الواقع سيظل $\Delta p_n(t)$ قريبا جدا من القيم العظمى $G_L \tau_p$ بعد عدد ستة أزمنة عمر [عند $t = 6\tau_p$ يصل $\Delta p_n(t)$ إلى $0.998\, G_L \tau_p$].

أخيـرا من المناسب هنا أن نُذكِّر القارئ بتجـربة قياس العمر لشبـه الموصل لارتبـاطهـا بالحل (3-58) أعلاه. على الأخص فى فتـرة وجود نبـضة الضـوء يتغـير $\Delta p_n(t)$ حـسب العلاقـة (3-60) ولكن نبضة الضـوء لا تدوم أكثر من $1\mu.sec$ تقـريبـا بينمـا عمـر الحـاملة فى حـدود $150\ \mu\ sec$. بالتالى نرى فقط جزءا صغيرا من المنـحنى فـى شكـل (٣-٢٦) ثم ينقطع الضـوء فتـصبح $G_L = 0$، وعندئذ نجد أن (3-58) تعطى :

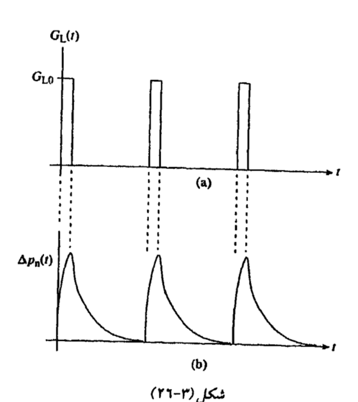


شكل (٣-٢٥) حل مثال (٤)
الزيادة فى التركيز الإضافى للشفرات (الناتجة عن التوليد الضوئى)
كدالة فى الزمن



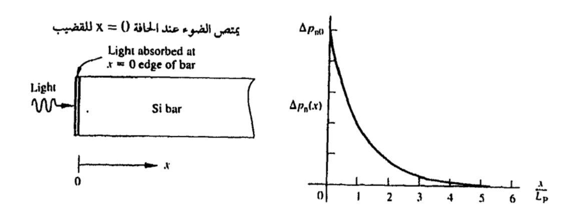
$$\Delta p_n(t) = \Delta p_n(0)\, e^{-t/\tau_p}$$

حيث $t = 0$ هنا هو لحظة انقطاع الضـوء ونظرا لأن انقطاع الضوء يستـغرق زمن عدة أعمار حاملة فإن $\Delta p_n(t)$ يجد الوقت الكافى للاضمحـلال بقرب الصفر ثم تتكرر هذه العملية مرة أخرى فى الـشكل (٣-٢٦ أ) يوضح التوليد الضوئى مع الزمن والشكل (٣-٢٦ ب) يعطى تغير $\Delta p_n(t)$ مع الزمن كما أسلفنا.



شكل (٣-٢٦)

أ - نموذج مبسط للضوء الناتج عن ستروبسكوب فى تجربة قياس اضمحلال التوصيلية الضوئية.
ب - مخطط للحلين - المناظرين للضوء والإظلام - لتركيز الحاملات الأقلية الزائدة.



شكل (٣-٢٧)

أ - تعريف بالرسم للمثال (٣-٥). ب - حل المثال (٣-٥) موضحا تغير تركيز الشواغر الزائدة داخل قضيب سيليكون كدالة فى الموضع المطبع x / L_p .

مثال ٣-٥ :

يبين الشكل (٣-٢٧) قضيبا من السيليكون شبه لا نهائى يمتد من $x = 0$ حتى $x \to \infty$ ومشاب بتركيز منتظم $N_D = 10^{15} / \text{cm}^3$ تضاء العينة من ناحية الطرف $x = 0$ حيث تتولد $\Delta p_n = 10^{10}/\text{cm}^3$ شغرة إضافية. عند الطول الموجى للضوء المستخدم يحدث امتصاص كلى للضوء عند السطح $x = 0$ ولا يوجد ضوء بالداخل $(x > 0)$. احسب $\Delta p_n (x)$.

الحل :

هنا أيضا شبه الموصل منتظم الإشابة.

شبه الموصل فى حالة استقرار ويمكن استنباط ذلك من رأس المسألة حيث المطلوب هو $\Delta p_n (x)$ وليس $\Delta p_n (x,t)$. الشروط المحيطية هى: $\Delta p_n (0) = \Delta p_{n0} = 10^{10}/\text{cm}^3$، أيضا $\Delta p_n (x) \to 0$ عندما $x \to \infty$ (طبعا x تئول لما لا نهاية هى نقطة داخل شبه الموصل؛ لأن القضيب لا نهائى) والسبب فى ذلك أنه عند هذا العمق ستزول القلقلة الناتجة عن الضوء السطحى، وبالتالى $\Delta p_n \to 0$.

أخيرا لم يذكر رأس السؤال درجة الحرارة، فى هذه الحالة نفترض أنها درجة حرارة الغرفة $T = 300$ K.

طبعا إذا أطفئ الضوء فى هذه المسألة وبعد حدوث الاستقرار -كما وصفنا بالمثال السابق- سنصل لقيم الاتزان $n_o = N_D = 10^{15} /\text{cm}^2$، $p_o = n_i^2/ n_o = 10^5 / \text{cm}^3$ ويصير تركيز الحاملات منتظما.

لننظر الآن كيفيا لما سيحدث نتيجة عدم نفاذ الضوء إلى داخل قضيب السيليكون. الضوء سيولد حاملات إضافية عند $x = 0$. بسبب هذه الزيادة سيحدث انتشار للحاملات إلى الداخل كذلك فإن ظهور شغرات إضافية سيحفز الالتئام الحرارى، وبما أن عمر الشغرات محدود ويساوى τ_p بالمتوسط، نتوقع اضمحلالا فى أعداد الشغرات الإضافية كلما توغلنا لعمق شبه الموصل. وبينما تكون $\Delta p_n (x)$ أكبر ما يمكن عند $x = 0$ فإنها ستئول للصفر عند $x \to \infty$.

من أجل الوصول للحل الكمى علينا أن نلاحظ أن النظام قيد البحث أحادى البعد وأن التحليل مقصور على الحاملات الأقلية (الشغرات فى هذه الحالة)، تركيزات الاتزان n_o ، p_o غير معتمدة على الموضع، الالتئام - التوليد الحرارى R-G هو المهيمن، ولا توجد عمليات أخرى داخل شبه الموصل أى عند $x > 0$ وتسود ظروف الحقن المنخفض المستوى؛ لأن $\Delta p_{n/\max} = \Delta p_{no} = 10^{10}/ \text{cm}^3 << n_0 = 10^{15} / \text{cm}^3$.

التساؤل الوحيــد حول تحقق فرضيات مـعادلة الانتشار هو: هل $\mathcal{E} = 0$ ؟ بالرغم من وجود تدرج فى $\Delta p_n\,(x)$ بالتناقص كلمـا زادت x، الحـقيـقـة أن Δp_{no} صـغيـرة ($\Delta p_{no}=10^{10}/\mathrm{cm}^3 = n_i$)، بحيث إن المجال المبيت لن يكون كبيرا. بالإضافة إلى أن عادة الحامـلات الأغلبية (الإلكترونات) تعـيد توزيع نفسـها بحيث تلغى تأثير المجـال المبيت بدرجة كبيرة. الافتراض أن $\mathcal{E} = 0$ فى هذه المسألة يعتبر افتراضا واقعيا.

عند $x > 0$ $G_L = 0$ ، وبالتالى معادلة انتشار الشغرات تختزل إلى :

$$D_p \frac{d^2 \Delta p_n}{dx^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p} = 0 \quad , \quad x > 0 \qquad (3\text{-}62)$$

بالشروط المحيطية :

$$\Delta p_n \;(x = 0) = \Delta p_{no} \qquad (3\text{-}63)$$

$$\Delta p_n \;(x \to \infty) = 0 \qquad (3\text{-}64)$$

من الجدول (٣-٢) نستطيع أن نكتب حل (3-62) :

$$\Delta p_n \;(x) = \mathrm{A}\, e^{-x/L_p} + \mathrm{B}\, e^{x/L_p} \qquad (3\text{-}65)$$

حيث :

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \qquad (3\text{-}66)$$

من الشـرط (3-64) أى $\Delta p_n\;(x \to \infty) = 0$ ينتج أن $\mathrm{B} = 0$ ومن الشـرط (3-63) نجد أن :

$$\mathrm{A} = \Delta p_{no} \qquad (3\text{-}67)$$

أى أن :

$$\Delta p_n \;(x) = \Delta p_{no}\, e^{-x/L_p} \qquad (3\text{-}68)$$

الحل الناتج مرسوم بالشكل (٣-٢٧ ب) ويحقق ما سبق أن توقعناه من أن $\Delta p_n(x)$ ستضمحل كلما زادت x وحتى تصل إلى الصفر عند $x \to \infty$. ويميز هبوط $\Delta p_n(x)$ طول مميز هو L_p.

(٣-٥) مفاهيم إضافية Supplemental Concepts

٣-٥-١ أطوال الانتشار Diffusion Lengths

شاهدنا فى المثال السابق أن توليد حاملات أقلية إضافية عند نقاط مستوى معين فى شبه الموصل يصاحبه انتشار لهذه الحاملات مع هبوط أسى فى عدد الحاملات الإضافية مع زيادة المسافة من هذا المستوى. ويتميز هذا الهبوط بطول اضمحلال (L_p). هذا الطول يأخذ اسم طول انتشار الحاملات الأقلية ويعطى بالعلاقتين :

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \qquad (3\text{-}99\text{-}a)$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \qquad (3\text{-}99\text{-}b)$$

تعنى الكمية L_p (أو L_n) فيزيائيا، المسافة التى تنتشر خلالها الحاملات الأقلية ويقل فيها التركيز إلى $\frac{1}{e}$ من قيمته الأصلية. ولتقريب ذلك؛ تخيل أفواجا من الظباء تحاول اختراق غابة مليئة بالحيوانات المفترسة. طبيعى أن أعداد الظباء الناجية من الافتراس ستقل كلما توغلت أكثر فأكثر داخل هذه الغابة، ولنا أن نعرف طول انتشار متوسط L على أنه المسافة المتوسطة التى يستطيع ظبى أن يجتازها قبل أن يفترس.

ولنحاول الآن تقدير قيمة طول الانتشار فى السيليكون عند $T = 300$ K، $N_D = 10^{15}/\text{cm}^3$ بالتالى $\mu_p = 458$ cm²/ V.sec ونفترض أن $\tau_p = 10^{-6}$ sec . إذن :

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{(kT/q)\, \mu_p \tau_p} = \sqrt{(0.0259)\,(458)\,(10^{-6})}$$

$$= 3.44 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

وتتغير قيم أطوال الانتشار تغيرا واسعا بسبب التغير الواسع فى قيم العمر τ كما ذكرنا آنفا.

٣-٥-٢ أشباه مستوى فرمى Quasi - Fermi Levels

تستخدم أشباه مستويات فـرمى لتحديد تركيزات الحاملات داخل شبه الموصل فى حالة عدم الاتزان. لنفهم الحاجة لهذا المفهوم نعود للمثال (٣-٤). قبل $t = 0$ كان شبه الموصل فى حـالة اتزان، وبالتـالى تكون $n_o = N_D = 10^{15}/cm^3$ و $p_o = 10^5/cm^3$. يوضح الشكل (٣-٢٨ أ) مـخطط نطاق الطاقـة لحالة الاتـزان. بالفحص السـريع للمـخطط وموضع مستوى فرمى يوحى بتركيزات الاتزان للحاملات؛ لأن :

$$n_o = n_i \, e^{(E_F - E_i)/kT} \qquad \text{(3-71-a)}$$

$$p_o = n_i \, e^{(E_i - E_F)/kT} \qquad \text{(3-71-b)}$$

شكل (٣-٢٨) مثال لاستخدام لشبيهى مستوى فرمى. وصف نطاق الطاقة للوضع داخل شبه الموصل بالمثال ١ تحت ظروف

أ - الاتزان، و ب- عدم الاتزان ($t >> \tau_p$)

. النقطة التى نؤكـدها هنا أنه عنـد ظروف الاتزان يوجد تناظـر واحد لواحـد بين موضع مستوى فرمى وبين تركيزات الحاملات. إذا عرفنا E_F سنحدد n_o ، p_o والعكس بالعكس.

دعـونا نذهب الآن للوضع غيـر المتزن (لكنـه مسـتقـر زمنيا) فـى المثال (٣-٤) عندما $t >> \tau_p$ $\Delta p_n = G_L \tau_p = 10^{11} / cm^3$ ، بالتالى $p = p_o + \Delta p \approx 10^{11} / cm^3$ بينما $n \approx n_o = 10^{15} / cm^3$. أى أن n تظل كما هى بينما تزداد p بعدة رتب مقدارا وبالتالى الشكل (٣-٢٨ أ) لن يصلح لوصف هذه الحالة وفى الحـقيقة يعرف مسـتوى فرمى فقط للنظم فى حالة اتزان ولا يصلح للنظم التى فى حالة عدم اتزان

ولكى لا نفقد الفائدة من مخطط نطاق الطاقة كوسيلة مناسبة لاستنباط التركيزات بمجرد النظر، سنلجأ لمفـهوم أشباه مستويات فـرمى. فى هذا المفهوم يكون هنا زوج من أشبـاه مســتوى فرمى الأول للإلـكترونات F_n والثانى للشـغرات F_p ويمكن تعريفـهما كالآتى:

$$n \equiv n_i\, e^{(F_n - E_i)/kT}$$

$$F_n \equiv E_i + kT\, ln\left(\frac{n}{n_i}\right) \qquad \text{أو :} \qquad (3\text{-}72\text{-}a)$$

كذلك :

$$p \equiv n_i\, e^{(F_i - E_p)/kT}$$

$$F_n \equiv E_i + kT\, ln\left(\frac{p}{n_i}\right) \qquad \text{أو :} \qquad (3\text{-}72\text{-}b)$$

الثابتان F_n ، F_p يتحددان فقط بمعلومية قيم n، p وليس قبل ذلك. كذلك فإن كلا من F_n و F_p سينطبـقان على مستـوى فرمى E_F إذا ما عادت قيم n و p إلى قيم الاتزان n_o ، p_o؛ لأن فى هذه الحالة ستئول المعادلة (3-72) إلى (3-71).

وكتطبيق مباشـر على مفهوم أشبـاه مسـتوى فرمى نعـود للمثـال (٣-٤) عنـدما $t >> \tau_p$. أولا لا تتغـير n كثيـرا $n \approx n_o$ وبالتالى $F_n \approx E_F$. ثانيـا إذا عوضـنا بالقيـمة $p = 10^{11}/cm^3$ فى المعادلة (3-72-b) نجد أن : $F_p = E_i - 0.06$ eV، وبالتالى تستطيع أن ترسم مخطط نطاق طاقة جديد يبين F_n ، F_p وكذلك E_i، انظر الشكل (٣-٢٨ ب). طبعا بمجرد النظر سنعرف أننـا بإزاء حالة عدم اتزان. كذلك بملاحظة أن الفرق $E_i - F_p$ فى الشكل (٣-٢٨ ب) أقل من الفـرق $F_n - E_i$ سنعـرف على الـفـور أننا إزاء حـقن منخفض المستوى. طبعا إذا كانت p معتمدة على x سنجد أن F_p أيضا تعتمد على x.

نقطة أخيرة، يمكن استخدام أشباه مستويات فرمى فى إعادة صياغة بعض علاقات حركة الحـاملات فى صيغة مخـتصرة. فمثلا : الصـورة القياسية لتيـار الشغرات الكلى هى:

$$J_p = q\, \mu_p\, p\, \mathcal{E} - q\, D_p\, \nabla p \qquad (3\text{-}73)$$

[وهى نفسها المعادلة (3-18-a)]. بتفاضل طرفى المعادلة 72 b نحصل على :

$$\nabla p = \left(\frac{n_i}{kT}\right) e^{(E_i - F_p)/kT} \quad (\nabla E_i - \nabla F_p) \qquad (3\text{-}74\text{-}a)$$

$$= \left(\frac{q\,p}{kT}\right) \mathcal{E} - \left(\frac{p}{kT}\right) \nabla F_p \qquad (3\text{-}74\text{-}b)$$

حيث استخـدمنا التعويض $\mathcal{E} = \frac{\nabla E_i}{q}$ (الذى هو تعميم للمعادلة (3-15) لثلاثة أبعاد) فى الوصول من (3-74-a) إلى (3-74-b). الخطوة التالية هى أن نحذف ∇p فى المعادلة (3-73) باستخدام (3-74-b).

$$J_p = q \left(\mu_p - \frac{q\,D_p}{kT} \right) p\,\mathcal{E} + \left(\frac{q\,D_p}{kT} \right) p\,\nabla F_p \qquad (3\text{-}75)$$

لكن من علاقة آينشتين $q\,D_p / kT = \mu_p$ ، وبالتالى :

$$J_p = \mu_p\, p\, \nabla F_p \qquad (3\text{-}76)$$

وبالمثل :

$$J_n = \mu_n\, n\, \nabla F_n \qquad (3\text{-}76)$$

إذن التيار الكلى يتناسب مع ميل شبيهى مستويات فرمى F_p ، F_n. هذا معناه أن ميل شبيه مسـتوى فرمى عن الأفقية يشير لوجود تيار، وعندما يكون أفـقيا سيعنى عدم وجود تيار مار فى شبه الموصل.

مثال ٣-١ :

فى المثال (٣-٥) وجدنا أن الإضـاءة السطحية غيـر النافذة سببت حالة اسـتقرار والتى عندها الشغرات الإضـافية $\Delta p_n(x) = \Delta p_{no} \exp(-x / L_p)$. بافتراض أن الحقن منخفض المستوى فإن $n = n_o$ ، $p = p_o + \Delta p_{no}\, e^{-x/L_p}$.

للعينة المضاءة :

أ - من المعادلة (3-72) اوجد العلاقة المشابهـة للمستويين F_n، F_p فى القضيب المضاء.

ب- بيّن أن F_p دالة خطية فى x للنقط التى عندها $p_o >> \Delta p_n(x)$.

جـ- من الجزئين أ ، ب ارسم مخطط نطاق الطاقة الخاص بالمثال (٣-٥) تحت ظروف التوازن والاستقرار والإضاءة المستقرة (افترض أن $\mathcal{E} = 0$ بداخل العينة المعرضة للضوء).

د - هل يوجد تيار شغرات داخل العينة المضاءة فى حالة استقرار ؟ فسّر.

هـ- هل يوجد تيار إلكترونات ؟ فسّر.

الحل :

أ - حيث إن $n \approx n_o$ إذن من المعادلة (3-72-a) $F_n \approx E_F$. بالتعويض عن p كما فى رأس السؤال فى المعادلة (3-72-a) نستنتج أن :

$$F_p = E_i - kT\ ln\ (p/n_i)$$

$$= E_i - kT\ ln\ [p_o/n_i + (\Delta p_{no} / n_i)\ e^{-x/L_p}]$$

ب- فى المنطقة التى عندها $\Delta p_o / n_i\, e^{-x/L_p} >> p_o / n_i$ (أى قرب $x \approx 0$).

$$F_p \approx E_i - kT\ ln\ (\Delta p_{no}/n_i)\ e^{-x/L_p}$$

$$= E_i - kT\ ln\ (\Delta p_{no} / n_i) + (kT / L_p)\ x$$

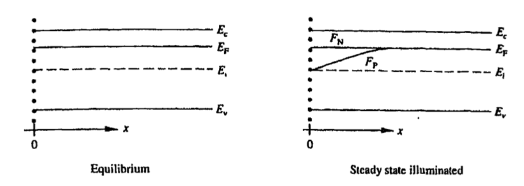
جـ- من مثال (٣-٥) نعرف أن $\Delta p_{no} = 10^{10} / cm^3$ ، $n_i = 10^{10} / cm^3$، وأيضا $p_o = n_i^2 / N_D = 10^5 / cm^3$ ، وبالتالى قرب $x = 0$ نجد من الجزء (ب) أن F_p تتغير خطيا مع x.

* عند $x = 0$ وبما أن $\Delta p_{no} = n_i$ إذن من الجزء (ب) $F_p = E_F$.

* عند x كبيرة $p = p_o$، وبالتالى $F_p = E_F$.

* $F_N - E_i \approx E_F - E_i = kT\ ln\ (N_D/n_i) = 0.30\ V$.

من النقط السابقة نرسم مخطط نطاق الطاقة الآتى:



مثال (٣-٦) حل الجزء (ج)

د - بما أن $d\,F_p\,/\,dx \neq 0$، وبالنظر للمعادلة (3-76-a) نستنتج أنه يوجد تيار شغرات قرب $x = 0$.

المظهر خداع. بالنظر لمخطط الطاقة سنجد أن F_n تقريبا أفقى بالتالى $dF_n/dx \approx 0$ فربما تقول أن $J_n = 0$ لكن هذا استنتاج خاطئ؛ لأن التيار الكلى يساوى صفرا، فى حالة الاستقرار أى أن : $J_p + J_n = 0$ وبما أن $J_p \neq 0$ إذن $J_n \neq 0$ صحيح أن $d\,F_n\,/\,dx$ تقريبا صفر لكنه ليس بصفر على أى حال، كما أن n (تركيز الأغلبية) كبير، وبالتالى حاصل الضرب $n\,d\,F_n\,/\,dx$ لا يساوى صفرا.

∴ الإجابة الصحيحة يوجد تيار، $J_N \neq 0$.

(٣-٦) ملخص وملاحظات ختامية

خصصنا معظم الفصل لمناقشة الفاعليات الأولية الثلاث للحاملات داخل شبه الموصل: الانسياق والانتشار والالتئام - التوليد. فى كل حالة جرى تعريف الفاعلية ثم تصويرها. الانسياق هو حركة الجسيمات المشحونة كاستجابة للمجال الكهربى المطبق. الانتشار هو هجرة الجسيمات من مناطق التركيز العالى للمناطق ذات التركيز الأقل بفعل الحركة الحرارية العشوائية. الالتئام - التوليد هو على التوالى فناء وظهور الحاملات. بعدها تم تحليل كل فاعلية على حدة من الناحية الكمية. ينشأ تيار جسيمات عن الانسياق والانتشار (المعادلات 4، 17، 19) أما الالتئام - التوليد فيتسببان فى التغير الموضعى لتركيز الحاملات كدالة فى الزمن (معادلة 34). وبالتحليل الكمى لكل فاعلية ظهر فى كل حالة «ثابت حركة» يحدد مدى نشاط هذه الفاعلية فى شبه الموصل المعطى

وكذلك حركيات الحاملات ومعاملات الانتشار وأعمار الحاملات الأقلية هى البارمترات (الوسائط) المعتمدة على نوع المادة فى حالات الانسياق، الانتشار، والالتئام - التوليد على التوالى. وبالنسبة لأشباه الموصلات الرئيسية توجد بيانات دقيقة عن تغير حركيات الحاملات كدالة فى درجة الحرارة والإشابة. عينة من هذه البيانات موضحة بالشكلين 5، 7. معاملات الانتشار يتم حسابها من الحركيات المناظرة باستخدام علاقة آينشتين (معادلة 25). وعلى العكس فإن أعمار الحاملات فى عينة ما لشبه موصل يتم تحديدها عن طريق القياس المعملى:

وبالرغم من أن الأنواع المختلفة لفاعليات الحاملات قد تم تقديمها وفحصها كل على حدة، إلا أنها فى الواقع تحدث معا فى وقت واحد. الدمج الرياضى للحصول على التأثير الإجمالى لأنشطة الحاملات يؤدى إلى معادلة الاتصال (معادلة46). ومعادلة الاتصال بدورها يمكن تبسيطها للوصول إلى معادلة انتشار الحاملات الأقلية (معادلة 54) بعد فرض سلسلة من الافتراضات الشائعة فى كثير من المسائل العملية. التبسيطات الإضافية وآثارها على معادلة انتشار الأقلية مبينة بالجدول (٣-١). الحلول شائعة الاستخدام للصيغ المبسطة من معادلة الانتشار مدرجة بالجدول (٣-٢).

معادلات الاتصال أو انتشار الحاملات الأقلية بالاشتراك مع معادلات أخرى مذكورة فى هذا الفصل تمكننا من نمذجة حالة شبه الموصل المتعرض لقلقلة خارجية. جدول (٣-٣) يغطى المعادلات الهامة فى هذا الفصل.

تعرضنا أيضا فى هذا الفصل لمواضيع أخرى على علاقة بفاعليات الحاملات فى شبه الموصل ومنها: المقاومية وقياسها، قياسات المجس الساخن، ثبات مستوى فرمى فى ظروف الاتزان عند كل مواضع شبه الموصل، الإشابة غير المنتظمة وارتباطها بالمجال الكهربى المبيت، مخططات الطاقة مع كمية الحركة *E-k*، قياس عمر الحاملات الأقلية، أطوال الانتشار. فى مواضع مختلفة بهذا الفصل تعرضنا لتفاصيل مخطط نطاق الطاقة. ورأينا مثلا أن وجود مجال كهربى داخل شبه الموصل يؤدى إلى انثناء النطاقات كدالة فى الموضع. وعندما ناقشنا الالتئام - التوليد أضفنا مستوى طاقة جديد قرب منتصف فجوة الطاقة. هذا المستوى الناتج عن وجود مراكز *R-G* يلعب دورا هاما فى التفاعلات الحرارية بين نطاقى التكافؤ والتوصيل. وفى النهاية قدمنا أشباه مستوى فرمى لوصف ظروف عدم الاتزان.

جدول (٣-٣) موجز معادلات فاعليات حاملات الشحنة

Table 3.3 Carrier Action Equation Summary.

معادلات الحالة *Equations of State*

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q}\nabla \cdot \mathbf{J}_N + \left.\frac{\partial n}{\partial t}\right|_{\substack{\text{thermal}\\ R-G}} + \left.\frac{\partial n}{\partial t}\right|_{\substack{\text{other}\\ \text{processes}}} \qquad \frac{\partial \Delta n_p}{\partial t} = D_N\frac{\partial^2 \Delta n_p}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_p}{\tau_n} + G_L$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q}\nabla \cdot \mathbf{J}_P + \left.\frac{\partial p}{\partial t}\right|_{\substack{\text{thermal}\\ R-G}} + \left.\frac{\partial p}{\partial t}\right|_{\substack{\text{other}\\ \text{processes}}} \qquad \frac{\partial \Delta p_n}{\partial t} = D_P\frac{\partial^2 \Delta p_n}{\partial x^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p} + G_L$$

علاقات التيار و R-G *Current and R–G Relationships*

$$\mathbf{J}_N = \mathbf{J}_{N|drift} + \mathbf{J}_{N|diff} = q\mu_n n\mathscr{E} + qD_N\nabla n \qquad \left.\frac{\partial n}{\partial t}\right|_{\substack{\text{i-thermal}\\ R-G}} = -\frac{\Delta n}{\tau_n}$$

⇕ drift ⇕ diffusion

$$\mathbf{J}_P = \mathbf{J}_{P|drift} + \mathbf{J}_{P|diff} = q\mu_p p\mathscr{E} - qD_P\nabla p \qquad \left.\frac{\partial p}{\partial t}\right|_{\substack{\text{i-thermal}\\ R-G}} = -\frac{\Delta p}{\tau_p}$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_N + \mathbf{J}_P$$

علاقات وسائط محورية *Key Parametric Relationships*

$$L_N \equiv \sqrt{D_N\tau_n} \qquad \frac{D_N}{\mu_n} = \frac{kT}{q} \qquad \tau_n = \frac{1}{c_n N_T}$$

$$L_P \equiv \sqrt{D_P\tau_p} \qquad \frac{D_P}{\mu_p} = \frac{kT}{q} \qquad \tau_p = \frac{1}{c_p N_T}$$

علاقات مقاومية وكهروستاتيكية *Resistivity and Electrostatic Relationships*

$$\rho = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)}$$

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n N_D} \quad \text{. . . } n\text{-type semiconductor}$$

$$\rho = \frac{1}{q\mu_p N_A} \quad \text{. . . } p\text{-type semiconductor}$$

$$\mathscr{E} = \frac{1}{q}\frac{dE_c}{dx} = \frac{1}{q}\frac{dE_v}{dx} = \frac{1}{q}\frac{dE_i}{dx} \qquad V = -\frac{1}{q}(E_c - E_{ref})$$

علاقات شبيهي فرمي *Quasi-Fermi Level Relationships*

$$F_N \equiv E_i + kT\ln\left(\frac{n}{n_i}\right) \qquad \mathbf{J}_N = \mu_n n\nabla F_N$$

$$F_P \equiv E_i - kT\ln\left(\frac{p}{n_i}\right) \qquad \mathbf{J}_P = \mu_p p\nabla F_P$$

أسئلة على الفصل الثالث :

١ - باستخدام مخطط نطاق الطاقة بيّن كيف يمكن تصوير :

أ - وجود مجال كهربى بداخل شبه موصل.

ب- إلكترون بطاقة حركة $K.E = 0$.

جـ- شغرة بطاقة حركة $K.E. = E_G / 4$.

د - توليد ضوئى.

هـ- توليد حرارى مباشر.

و- التئام نطاق لنطاق.

ز- التئام عبر مراكز $R\text{-}G$.

ح- توليد عبر مراكز $R\text{-}G$.

٢- اكتب إجابات قصيرة على الآتى :

أ - تتحرك الشغرات بسرعة انسياق متوسطة مقدارها 10^3 cm/sec عندما يكون هناك فرق جهد مقداره 2V بين طرفى قضيب شبه موصل طوله 1 cm ما هى حركية الشغرات داخل القضيب ؟

ب- سمى أهم آليتين تبعثر استطارة الحاملات فى شبه الموصل المشاب غير المفكك والذى جودته تصلح للنبائط.

جـ- هل حركية الناقلية تقل أو تزيد مع زيادة الإشابة ؟ قدم تفسيرا لإجابتك.

د - رقاقتان Ga As الأولى من النوع n، والأخرى من النوع p بحيث N_D فى الرقاقة الأولى تساوى N_A في الرقاقة الثانية وكلتاهما أكبر كثيرا من n_i حدد الرقاقة الأعلى مقاومية. اشرح.

هـ- تحددت حركية الإلكترونات فى عينة سيليكون بالقيمة $1300\ cm^2/V.sec$ عند درجة حرارة الغرفة. ما هو معامل الانتشار للإلكترونات ؟

و - ما هو التعبير الرياضى للحقن المنخفض المستوى؟

ز - استخدم ضوء لتوليد حاملات زائدة فى سيليكون. سيلتئم معظم هذه الحالات الزائدة بواسطة التئام (اختر واحدة) :

* نطاق - نطاق * مراكز $R\text{-}G$ * ضوئى

ح- عينة شبه موصل تحوى $N_D = 10^{14}$ / cm^3 مانحات ، و $N_T = 10^{11}$ / cm^3 مراكز $R - G$. استخدمت هذه العينة فى تصنيع نبيطة وبعد التصنيع وجد أن $N_D = 10^{17}$/cm^3 مانحات ، و $N_T = 10^{10}$/cm^3 مراكز $R\text{-}G$.

هل أدى التصنيع لزيادة أم نقصان فى عمر الحاملات الأقلية ؟ اشرح.

٣- الذاتية والمقاومية القصوى :

أ - احسب مقاومية الجرمانيوم والسيليكون وزرنخيد الجاليوم عندما تكون هذه المواد ذاتية وعند 300 K.

ب- احسب أعلى مقاومية ممكنة للجرمانيوم والسيليكون و Ga As عند 300 K.

٤- مزيد من الأسئلة عن المقاومية :

أ - عينة سيليكون عند درجة حرارة الغرفة ومشابة بانتظام بتركيز مانحات $N_D = 10^{16}$/cm^3 . احسب مقاومية العينة من المعادلة (3-8-a). قارن القيمة المحسوبة بالقيمة المستخرجة من الشكل (٣-٨ أ).

ب- عوضت العينة فى الجزء (أ) بإضافة تركيز متقبلات $N_A = 10^{16}$/cm^3. احسب مقاومية العينة المعوضة. (حاذر عند التعويض بقيم الناقلية فى هذا الجزء).

جـ- احسب مقاومية سيليكون ذاتى ($N_A = N_D = 0$) عند درجة حرارة الغرفة. قارن بين ρ المحسوبة هنا وتلك المحسوبة فى الجزء (ب).

د- صنعت مقاومية 500 Ω من قطعة سيليكون من النوع n على شكل قضيب مساحة مقطعه 10^{-2} cm^2 وطوله 1 cm عين تركيز الإشابة المطلوب.

هـ- سخنت عينة سيليكون مشابة خفيفا ($N_D < 10^{14}$ / cm^3) من درجة حرارة الغرفة إلى 100°C وبفرض أن $N_D >> n_i$ فى الحالتين فهل ستزيد أم ستقل مقاومية العينة؟ اشرح.

٥ - سألك أستاذك أن تبنى حساس حرارة لقياس المدى الحرارى ($-30°C < T < 40°C$) . وقررت أن تستخدم قضيبا من السيليكون غير المفكك لهذا الغرض على أن تستخدم التغير فى مقاومته للدلالة على درجة الحرارة وأنك ستستعمل ملتيمتر محمول يقيس المقاومية فى المدى $1\Omega < R < 1000\ \Omega$.

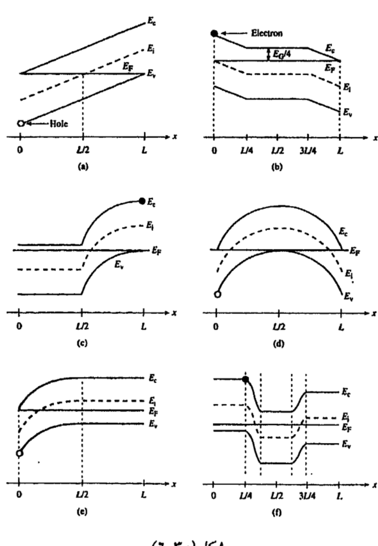
أ - حدد إشابة وأبعاد الحساس.

ب- احسب الحساسية dR / dT بوحدات $\Omega / °C$ للحساس الذى اخترته. من وجهة نظر الحساسية هل الأفضل استخدام إشابة عالية أم منخفضة ؟ اشرح.

جـ- ما هى أعلى وأقل درجة حرارة يمكن أن يستخدم فيها هذا الحساس تقريبا ؟

٦- تفسير مخططات نطاق الطاقة :

توجد فى الشكل (م٣-٦) ستة مخططات نطاق طاقة لست عينات سيليكون مختلفة عند 300 K اختر واحدا فقط من هذه المخططات (إذا قررت أن تعاود الكرة مع مخطط آخر فسيكون هذا قرارك أنت وليس قرارنا).



شكل (م٣-٦)

أ – هل تسود ظروف الاتزان ؟ كيف عرفت ذلك ؟

ب– ارسم مخططا للجهد الاستاتيكى $V(x)$ كدالة فى x.

جـ– ارسم مخططا للمجال الكهربى $\mathcal{E}\ (x)$ كدالة فى x.

د – تتحرك الحاملة عبر العينة جيئة وذهابا بين النقطتين $x = 0$ و $x = L$ بدون تغيير فى الطاقة الكلية. ارسم مخططا لكل من K.E. و P.E. للحاملة كدالة فى x. خذ E_F كمستوى مرجع.

هـ– ارسم مخططا سريعا لكل من n، p كدالة فى x.

و – ارسم أسهم توضح اتجاهات تيار الانسياق والانتشار -كل على حدة- فى كل المناطق. اشرح كيف اخترت الاتجاهات.

٧– داخل مركز ترانزستور Si ثنائي القطبية كانت الإشابة غير منتظمة بحيث إن: $p\ (x) = N_A\ (x) = n_i\ e^{(a - x)/b}\ ,\ 0 \leq x \leq L$.

حيث $a = 1.8\ \mu m$ ، $b = 0.1\ \mu m$ ، $L = 0.8\ \mu m$.

أ – ارسم مخطط نطاق طاقة موضحا فيه مواضع E_c ، E_F ، E_i ، E_v. اشرح كيف توصلت لهذا المخطط.

ب– ارسم مخطط المجال الكهربى $\mathcal{E}\ (x)$ واحسب قيمة ε عند $x = L/2$.

جـ– هل يساعد المجال المبيت حركة الإلكترونات فى الجزء من $x = 0$ حتى $x = L$ ؟ اشرح.

٨– افترض أن $E_T = E_i$ وأن $n_1 = p_1 = n_i$ وأن $\Delta n = \Delta p$ ، وكذلك $\tau_n = \tau_p$.
اثبت أنه فى هذه الحالة تئول المعادلة العامة (3-35) للحالة الخاصة (3-34) فى حالة الحقن المنخفض المستوى.

٩– تعرف المعادلة

$$\frac{\partial\ \Delta n_p}{\partial t} = D_N\ \frac{\partial^2\ \Delta n_p}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_p}{\tau_n} + G_L$$

بمعادلة انتشار الحاملات الأقلية للإلكترونات.

أ – لماذا تسمى معادلة انتشار ؟

ب– لماذا تسمى بمعادلة حاملات أقلية؟

جـ– هذه المعادلة صحيحة فقط عند مستوى حقن منخفض. لماذا؟

١٠- أثبت أنه فى ظروف الحالة المستقرة فإن $\Delta p_n(x) = \Delta p_{no}(1- {}^{x}/L), 0 \le x \le L$ داخل عينة Si من نوع n ستكون حلا خاصا لمعادلة انتشار الحاملات الأقلية -الشغرات هنا- إذا ما أهملنا كل عمليات R-G ، وافترضنا أيضا أن $\Delta p_n(0) = \Delta p_{no}$ ، و $\Delta p_n(L) = 0$.

(عادة ما نهمل عمليات R-G إذا كان L أقل بكثير من طول انتشار الحاملات الأقلية L_p وسوف يستخدم هذا الحل الخاص كثيرا فى هذه الحالة).

١١- رقاقة سيليكون ($N_A = 10^{14}$ / cm^3 ، $\tau_n = 1\ \mu$ sec) ، فى درجة حرارة الغرفة) أضيئت أولا لفترة زمنية أطول كثيرا من τ_n بضوء ولّد $G_{LO} = 10^{16}$ e-hp (e-hp هو زوج إلكترون - شغرة) لكل cm^3 لكل ثانية بانتظام فى الحيز الكامل للسيليكون.

عند $t = 0$ خفض الضوء بحيث تقلص المعدل G_{LO} إلى النصف ($\frac{G_{LO}}{2}$) لكل $t \ge 0$. احسب $\Delta n_p(t)$ لكل $t \ge 0$.

شكل (م٣-١٢)

١٢- قضيب نصف نهائى من النوع p (انظر الشكل م ٣-١٢) يضاء بضوء يولد G_L زوجا من الإلكترونات - الشغرات لكل cm^3 - sec بانتظام فى الحيز الكامل لشبه الموصل. بنفس الوقت تسحب الحاملات عند $x = 0$ لتجعل $\Delta p_n = 0$ عند $x = 0$. بافتراض أن الحالة المستقرة قد تحققت وأن $\Delta n_p(x) << p_o$ لكل قيم x، عين $\Delta n_p(x)$.

شكل (م٣-١٣)

١٣- كما هو مبين بالشكل (م٣-١٤) فإن الجزء $x > 0$ لشبه الموصل الممتد إلى ما لا نهاية من الطرفين هو فقط الذى يضاء. يولد الضوء $G_L = 10^{15}$ زوج إلكترونات شغرات بانتظام لكل cm^3-sec فى منطقة القضيب $x > 0$. فى المنطقة $x < 0$ $G_L = 0$. بافتراض استقرار الحالة وأن شبه الموصل عبارة عن سيليكون مشاب بانتظام لـ $N_D = 10^{18}$/cm^3، $\tau_p = 10^{-6}$ sec، وأن $T = 300$ K.

أ - ما تركيز الشغرات عند $x = -\infty$ ؟ اشرح.

ب- ما تركيز الشغرات عند $x = +\infty$ ؟ اشرح.

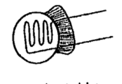
جـ- هل شرط الحقن المنخفض محقق ؟ اشرح.

د - حدد $\Delta p_n (x)$ لكل قيم x .

تلميح :

كل من : $\Delta p_n (x)$، و $d\Delta p_n (x) / dx$ يجب أن يتصلا عند النقطة $x = 0$.

١٤- كبريتيد الكادميوم Cd S هى المادة الأكثر استخداما فى تصنيع كواشف الموصلات الضوئية للضوء المرئى. الموصل المرئى CdS له حساسية ضوئية عالية ومنحنى رد الفعل الطيفى له يماثل نظيره للعين البشرية. الموديل VT 333 من الموصل الضوئى CdS مصور فى الشكل (م ٣-١٤).



مخطط تفصيلى



شكل (م٣-١٤)

أ - خمن لماذا يلتوى نمط الغشاء الموصل كالثعبان ؟

ب- نفترض أن غشاء VT 333 باتساع 0.3 mm وطول 3 cm وسمك غشاء CdS هو 5 µm، وأن $N_D = 10^{13}/cm^3 >> n_i$ و $\mu_n = 100\ cm^2/V\text{-}sec$، احسب المقاومة الظلامية للنبيطة.

جـ- تصبح مقاومة VT 333 250 Ω إذا ما أضيئت بضوء معين. هل يمكن استخدام المعادلات المعتادة لتحديد G_L المطلوبة لإنتاج قيمة المقاومة المذكورة أعلاه؟ اشرح.

١٥- تناظر ظروف الاتزان المستقرة لشبه موصل قبل وبعد الإضاءة مخططى الطاقة بالشكل (م ٣-١٥) $T = 300\ K$ ، $n_i = 10^{10} / cm^3$ ، $\mu_n = 1345\ cm^2/V\text{-}sec$ $\mu_p = 458\ cm^2/V\text{-}sec$. حدد من المعلومات المتوافرة :

E_c — F_N — 0.318 eV — E_i — 0.3 eV — F_P — E_v

(ب) بعد

E_c — E_F — 0.3 eV — E_i — E_v

(أ) قبل

شكل (م٣-١٥)

أ - n_o ، p_o تركيزات الحاملات عند الاتزان.

ب- n ، p تحت الظروف المستقرة فى وجود الإضاءة.

جـ- N_D.

د - هل لدينا حقن منخفض المستوى ؟ اشرح.

هـ- احسب المقاومية قبل وبعد الإضاءة.





الفصل الرابع

أساسيات تصنيع النبائط

BASICS OF DEVICE FABRICATION



(٤-١) مقدمة

نعرض فى هذا الفصل ملخصا مختصرا جدا لكيفية تصنيع نبائط السيليكون. والهدف من هذا الفصل هو إعطاء فكرة عامة حول البنية الفيزيائية للنبيطة. وحتى هؤلاء الذين سوف يتعرضون فى المستقبل لدراسة نظرية بحتة عن النبائط يمكنهم الاستفادة من هذا العرض؛ لأن الطريقة التى تبنى بها النبيطة ستحدد بارامترات تشغيلها، وبالتالى تؤثر على نوع التبسيطات والافتراضات التى نلجأ إليها عند تحليل عمل هذه النبائط.

ونتناول فيما يلى العمليات الأساسية والتى تشبه لبنات البناء، فهذه العمليات تتكرر ضمن منظومات متكررة عند تصنيع الدائرة المتكاملة IC الحديثة.

وفى نهاية الفصل سنتناول منظومة العمليات المستخدمة فى تصنيع ثنائيات الوصلة *pn* كمثال توضيحى على كيفية تصنيع الدائرة المتكاملة، الوصلة *pn* تدخل فى بنية كثير من النبائط المستخدمة اليوم. وسيخلو هذا الفصل من الأمثلة العددية والمسائل والمعادلات وسيعرض الموضوع بطريقة وصفية.

(٤-٢) عمليات التصنيع Fabrication Processes

٤-٢-١ الأكسدة Oxidation

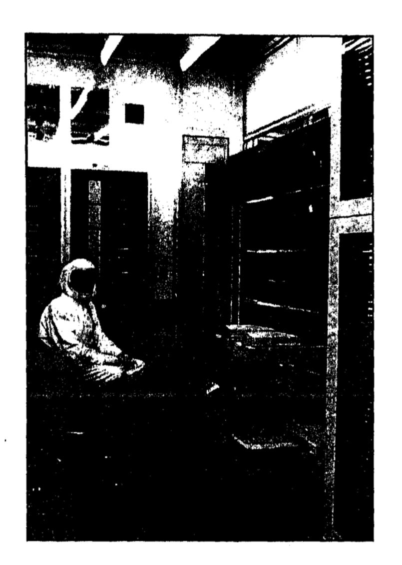
أدى توافر السيليكون فائق الجودة إلى هيمنة هذا العنصر على تكنولوچيا النبائط. ووظيفة أكسيد السيليكون مزدوجة؛ فهو يعمل كعازل كهربى داخل النبيطة، كما أنه يكبح انتشار ذرات الشوائب إلى مناطق غير مرغوب فيها داخل النبيطة أثناء عمليات تصنيعها. ويعتبر السيليكون شديد التفاعل وإذا تعرض لهواء الغرفة فسرعان ما يكون طبقة أكسيد رقيقة على سطحه. ولصنع طبقة أكسيد يترك السيليكون يتفاعل مع جو من الأكسچين (الأكسدة الجافة) أو مع بخار الماء (الأكسدة المبتلة) عند درجة حرارة عالية. فى كلتا الطريقتين يتسلل العامل المؤكسد خلال طبقة الأكسيد للسطح الفاصل بين السيليكون وأكسيده لتكوين مزيد من الأكسچين. لدينا هنا تفاعلان :

أكسدة جافة : $Si + O_2 \longrightarrow SiO_2$

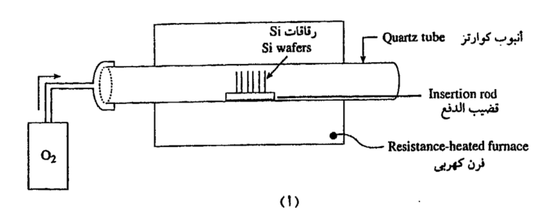
أكسدة مبتلة : $Si + 2H_2O \longrightarrow SiO_2 + 2H_2$

تستخدم الأكسدة الجافة فى تصنيع الطبقات العازلة للتيار، والتى عادة ما تكون غاية فى الدقة داخل بنيان النبيطة. كمثال على ذلك نذكر طبقة الأكسيد الرقيقة تحت بوابة ترانزستور تأثير المجال MOSFET هنا لا بد من استخدام الأكسدة الجافة لأنها القادرة على إنتاج هذه الغلالات الدقيقة بخواص ممتازة.

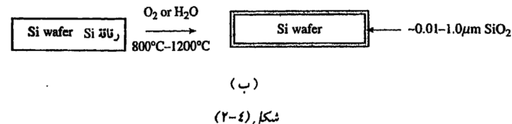
ومن ناحية أخرى تستخدم الأكسدة المبتلة فى تشكيل الحواجز السميكة بسرعة. يوضح شكل (٤-١) خط إنتاج يشمل فرن الأكسدة-الانتشار.



شكل (٤-١) صورة خط إنتاج بنك الأفران المستخدمة للأكسدة والانتشار. نهايات ثلاثة من أفران تقع عند مركز يمين الصورة ويجلس المشغل فى حلته النظيفة بجانب لوحات التحكم بالأفران.



(أ)



(ب)

شكل (٤-٢)
(أ) مخطط توضيحى مبسط لنظام أكسدة
(ب) وصف موجز لعملية الأكسدة

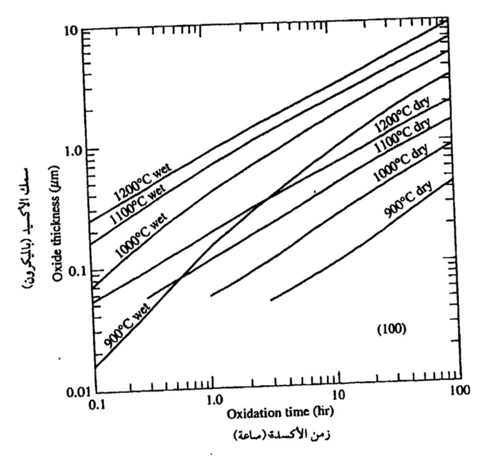
ويبين شكل (٤-٢-أ) تخطيطا مبسطا للفرن ونظام الإدخال بينما يلخص شكل (٤-٢-ب) عملية الأكسدة.

فى عملية أكسدة نمطية يتم التسخين باستخدام سخان مقاومة عند درجة حرارة من ٨٠٠ درجة مئوية إلى ١٢٠٠ درجة مئوية. يتم تجهيز عناصر التسخين والتى تأخذ شكل ملفات بحيث يتم تسخين المنطقتين الطرفيتين بقدرة أكبر لتعويض الفقد الحرارى عند أطراف الفرن بحيث تكون درجة حرارة الفرن منتظمة على طول المنطقة الوسطى الطويلة نسبيا. وعموما لا يسمح بتغير فى درجة الحرارة على طول هذه المنطقة بأكثر من درجة واحدة مئوية. عادة ما تأخذ المنطقة الوسطى شكل أنبوب يصنع من الكوارتز الشفاف أو من كربيد السيليكون أو من سيليكون متعدد التبلّور.

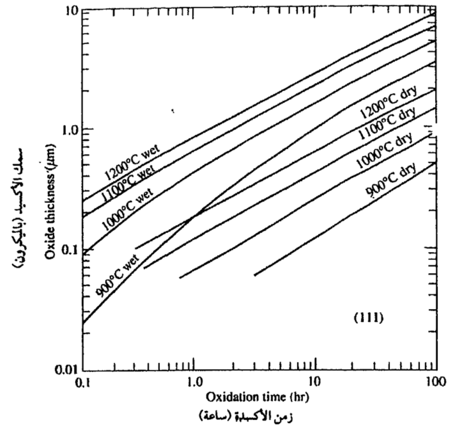
يتم تحميل رقائق السيليكون المراد أكسدتها رأسيا فى شقوق تسمى بالقوارب محفورة فى الكوارتز. وبعد التحميل تدفع القوارب إلى مركز الفرن. أثناء الأكسدة الجافة يندفع غاز الأكسچين من مؤخرة الأنبوب، أما فى حالة الأكسدة المبتلة فإن الأكسچين يستبدل بغاز حامل (أرجون أو نتروچين) تم ترطيبه قبل ذلك عن طريق ضخه

كفقاقيع خلال ماء موجود بدورق ساخن. وأحيانا يستخدم بخار الماء فى الأكسدة، وللحصول على بخار ماء نقى يحرق خليط من الأكسچين والهدروچين عند مدخل الفرن، وتسمى هذه الطريقة بالأكسدة البيروچينية المبتلة.

يتحدد زمن بقاء الرقائق بالفرن على عوامل كثيرة؛ أهم هذه العوامل هى درجة حرارة الفرن وثخانة طبقة الأكسيد المطلوبة واتجاهية محاور بلّورية الرقاقة بالنسبة لسطحها كما هو موضح بالشكلين (٤-٣-أ)، (٤-٣-ب). فى النظم التجارية يتم التحكم أتوماتيكيا فى كل عمليات تحميل الرقائق ودفعها إلى الداخل وضبط الحرارة وضبط الغاز المتدفق.



شكل (٤-٣-أ) منحنيات الأكسدة الجافة والمبتلة بسمك الأكسيد SiO_2 المتكون كدالة فى الزمن على سطح سيليكون (100)

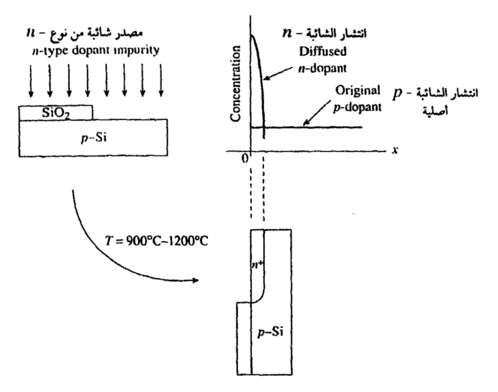


شكل (٤-٣-ب) منحنيات الأكسدة الجافة والمبتلة بسمك الأكسيد SiO_2 المتكون كدالة فى الزمن على سطح سيليكون (111)

٤-٢-٢ الانتشار Diffusion

استخدم انتشار الذرات خلال مـادة صلبة منذ زمن بعيد لتطعيم هذه المادة بذرات عنصر غريب. ويطبق نفس المبـدأ إذا أريد تطعيم شبيكة شبه الموصـل بذرات خارجية. ويوضح الشكل (٤-٤) عمليـة الانتشار حـيث يتم تعريض سطح الرقائق شـبه الموصلة لمصدر الذرات الشائبة وهذا المصدر قد يكون فى حالة صلبة أو سائلة أو غازية. وأحيانا قد نجـرى تفاعلا كـيميائيـا عند سطح الرقائق يؤدى إلى أن تنتـشر الذرات المترسـبة من التفاعل ببطء عند درجات حرارة عالية داخل شبه الموصل عبر المناطق غير المحمية بطبقة أكسيد. وتكون القوة الدافعة لهذا الانتـشار هى فرق تركيز الذرات الشائبة خارج وداخل البلّورة (من المعلوم أن الذرات تتحـرك بفعل الحرارة من المناطق الأعلى تركـيزا للمناطق الأقل تركيزا مثلما يحدث عند سقوط نقطة حبر داخل كوب من الماء النقى).

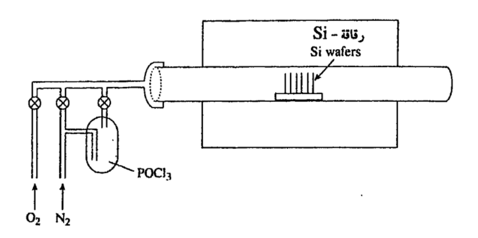
نستطيع الحصول على تركيز عـال من الشوائب بهذه الطريقة قد يصل حتى 10^{21} ذرة شائبة لـكل سم مكعب من مادة شبه الموصل. وطبـقا لنوعية الذرات الشـائبة يمكن



شكل (٤-٤) عمليات الانتشار الأساسية

التحكم فى نوع المنطقـة السطحية لشبه الموصل فنـجعلها من النوع p أو النوع n حسب الرغبة. يجب أن نذكر هنا أن الانتشار يحدث أيضا عبر طبقة الأكسيد لكن بمعدل بطىء للغاية بالمقارنة بالمناطق الخـالية من الأكسيد، وهذا يعنى أن الأكسيـد يحمى الطبقة التى تحته من هجوم انتشـار الذرات الغريبة لفترة زمنية محدودة. يتـحدد زمن تعرض الرقائق للمادة الشائبة على عـوامل منها ثخانة طبقة الأكسيد ودرجـة الحرارة داخل شبه الموصل وعلى التركيز المتوافر خارج الرقاقة.

تنفذ عـملية الانتشار داخل نـظام أنبوبى مشابه للنـظام المستخدم فى بناء طبـقات الأكسيـد وتكون درجات الحرارة متشابهـة أيضا (تتراوح من 900°C، وحتى 1200°C) الفـرق بين العمليـتين أن الوسط المؤكسـد خارج الرقـائق يستـبدل هنا بمصـدر للذرات الشائبة. يوضح الشكل (٤-٥) كـيفية تطعيم رقائق السيليكـون بذرات من الفسفور عن طريق الانتشار. أولا يمرر الغاز الحامل (النتروچين) كفقاقيع خلال أوكسيكلوريد الفسفور السائل ($POCl_3$) عند درجـة حرارة الغـرفة. يلتـقط النتروچين بخـار السائل المـصدر ويوصل هذا البخار لداخل أنبوب الفرن. فى نفس الوقت يسمـح لكمية صغيرة من غاز الأكسچين بالدخول للفرن وينتج عن تفاعل بخار الأوكسيكلوريد مع الأكسچين ترسيب



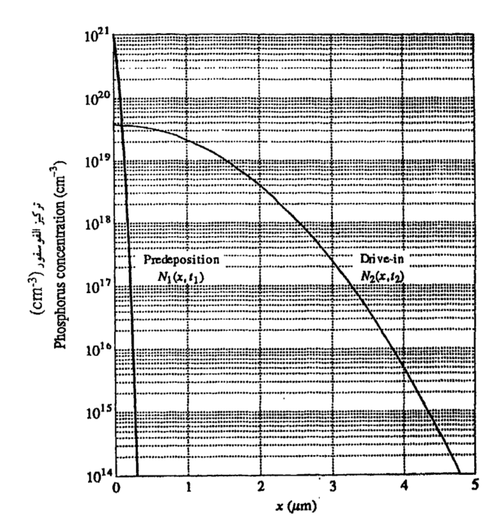
شكل (٤-٥) رسم تخطيطي لانتشار الفسفور باستخدام مصدر سائل

أكسيد الفسفور P_2O_5 على سطح رقاقة السيليكون. يتفاعل أكسيد الفسفور بدوره مع السيليكون محررا ذرات الفسفور عند السطح. وبما أن درجة الحرارة تكون عاليه تأخذ بعض ذرات السيليكون طريقها إلى داخل الرقائق، ويراعى أثناء عملية تمرير الفسفور عدم رفع درجة الحرارة لأن ذلك يؤدى إلى تكوين مركبات غير مرغوب فيها على سطح السيليكون؛ ولذلك يجب فصل مصدر الشوائب (غاز النتروجين المحمل بأوكسيكلوريد الفسفور) قبل بدء الخطوة الثانية والتى يتم فيها تنشيط انتشار الشائبة التى تم ترسيبها فى الخطوة السابقة. ومن الضرورى رفع درجة الحرارة بالخطوة الثانية للإسراع بانتشار الفسفور لعمق رقائق السيليكون. تسمى الخطوة الأولى بخطوة قبل الترسيب predeposition وأثناءها يتم توصيل الشائبة لسطح الرقاقة. ثم تجيء الخطوة الثانية وتسمى بخطوة الدفع للداخل drive - in وعندها ينقطع مصدر الشوائب وترفع درجة الحرارة.

بعد تنفيذ الخطوتين السابقتين، قبل الترسيب ثم الدفع للداخل، نجد أن تركيز الشوائب داخل الرقاقة يمكن تمثيله بالدالة $N(x)$ حيث x تمثل المسافة التى عندها التركيز $N(x)$ مقاسة من السطح، الدالة $N(x)$ تشبه الجرس المقلوب وتسمى بدالة الجاوشيان :

$$N(x) = N_o \exp\left(-\frac{x^2}{2\alpha^2}\right)$$

الثابتان N_o و α يتحددان بأزمنة ودرجات حرارة مرحلتى قبل الترسيب والدفع للداخل، الشكل (٤-٦) يبين تركيز ذرات الفسفور بعد خطوة قبل الترسيب استغرقت عشر دقائق وتليها خطوة دفع للداخل في ثلاثين دقيقة، وكانت درجة حرارة الخطوة الأولى 1000 °C والثانية 1200 °C.



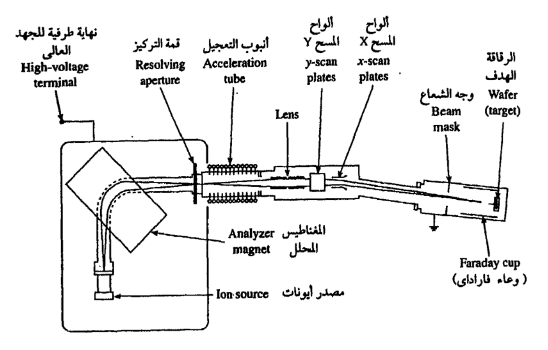
شكل (٤-٦) تغير تركيز الفسفور مع العمق (البروفيل)
كما هو محسوب من نماذج رياضية

٤-٢-٣ الغرس الأيونى Ion Implanation

الغرس الأيونى هو البديل العصرى لعملية الانتشار لإدخال الذرات الشائبة للمنطقة القريبة لسطح شبه الموصل. والغرس الإلكترونى لا يمكن الاستغناء عنه عندما نريد أن نصنع وصلة pn بسمك رقيق وتركيزات شوائب عالية عند درجة حرارة منخفضة. ونظرا لأن الغرس الإلكترونى يوفر تحكما أدق بكثير من عملية الانتشار فقد أصبح حصان الشغل فى عمليات التصنيع الحالية.

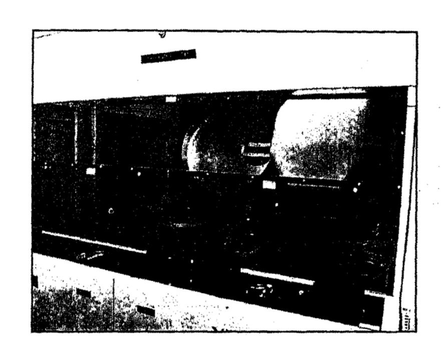
فى هذه الطريقة تحضر الشوائب على شكل أيونات ثم يتم تعجيل هذه الأيونات لطاقة عالية (من عدة كيلو إلكترون ڤولت وحتى عدة ميجا إلكترون ڤولت) ثم تطلق هذه

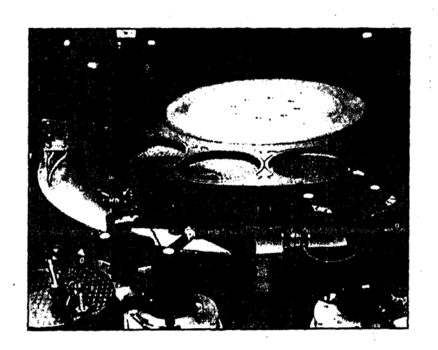
الأيونات السريعـة على سطح شبـه الموصل، وبذا تستقـر بداخله فى الموضع المطلوب. طبعا تطيح هذه الأيونات بعض ذرات السيليكون عن مواضعها البلّورية الصحيحة منشئة عيـوبا فى الانتظام البلّورى، لكن هذه العيوب يمـكن التخلص منها بسـهولة عن طريق تلدين الرقائق بتسخينها وجعلها تبرد فى بطء.



شكل (٤-٧) مخطط مبسط لنظام غرس أيونى

ويبين الشكل (٤-٧) مخطـطا مبسطا للغـرس الإلكـترونى، كمـا يصور الشكل (٤-٨) مـحطة غرس تجـارية تظهر فـى يسار الشـكل مـرحلة فـصل الأيونات المطلوبة باستعمال المطياف الكتلى لاستبعاد الأيونات غير المرغوب فيها. يلى ذلك مرحلة تعجيل الأيونات ويليها مرحلة تبـئير الشعاع الأيونى وفى النهاية المسح والتى يتم فـيها انحراف الشعاع الأيونى بواسطة جهد إستـاتيكى لجعل الشعاع يغطى السطح المطلوب. فى بعض النظم نجعل الشعاع الأيونى ينحرف ليمسح سطح الرقاقة بالكامل وفى نظم أخرى يمسح الشعاع جزءا صغيرا من الرقاقة ثم تحرك الرقاقة لمسح الجزء التالى وهكذا. يمر تيار صغير من الإلكترونات لظهـر الرقاقة لمعـادلة شحنة الأيونات المغروسـة وعند قياس هذا التـيار يمكن تحديد العـدد الكلى للأيونات، وهذا العدد والذى يسمى بالجرعـة هام للتحكم فى عملية الإشابة بالغرس الأيونى.





شكل (٤-٨) صورة لمحطة غرس أيونى

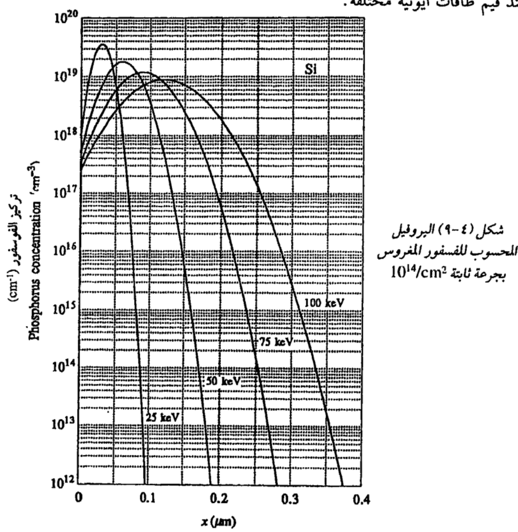
في الصورة العلوية الفتحة اليسرى مفتوحة لتحميل الرقائق، بينما يتم الغرس بالجزء الأيمن.

فى الصورة السفلى صورة مكبرة لصحون الرقاقات وذراع الروبوت الذى يحمل وينزل الرقاقات

يمكن تمثيل بروفيل الشوائب المغروسة بدالة جاوشيان مشابهة للدالة السابقة ولكنها مزاحة بأكملها إلى العمق بمسافة R_p أى :

$$N(x) = N_o \, exp \left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\,\alpha^2} \right]$$

يخبرنا علم الإحصاء أن R_p هو موضع قمة جرس الجاوشيان المقلوب أما α فهى اتساع هذا الجرس. فى كتاب كتالوجات أجهزة الغرس الإلكترونى تسمى R_p بمدى الإسقاط وتسمى α بالتطوّح (الانحراف المعيارى). قيمتى مدى الإسقاط والتطوح تتحددان بحسب نوع الأيون الساقط وطاقته. كما تتحدد (N_o) بواسطة الجرعة المغروسة. يوضح الشكل (٤-٩) توزيعات محسوبة لتركيز الفسفور المغروس أيونيا داخل السيليكون عند قيم طاقات أيونية مختلفة.



شكل (٤-٩) البروفيل المحسوب للفسفور المغروس بجرعة ثابتة $10^{14}/cm^2$

وكما يحدث فى عملية الانتشار يلزم استخدام قناع أثناء الغرس الإلكترونى لمنع الغرس فى المناطق غير المطلوب إشابتها. ولهذا الغرض تستخدم طبقة رقيقة من أوكسيد السيليكون SiO_2 أو نيتريد السيليكون Si_3N_4 وفى أحيان قليلة قد تستخدم طبقة من الألومنيوم أو المقاوم الضوئى لهذا الغرض وبالأساس يوقف القناع الأيونات قبل وصولها للسيليكون فى المناطق غير المطلوب إشابتها.

مزايا الغرس الأيونى عديدة كما أسلفنا بالمقارنة بالانتشار فهو يجرى فى درجة حرارة منخفضة (درجة حرارة الغرفة) ولا يحتاج الغرس لتليين مرتفع الحرارة (يتم التليين عند درجة حرارة 600°C) وفى جميع الأحوال يمتاز الغرس بأن اتساع بروفيل الشوائب داخل السيليكون يكون أقل من نظيره فى عملية الانتشار وهذه ميزة أساسية عندما يتعلق الأمر بتصنيع النبائط المتناهية الصغر التى تصنع روتينيا اليوم. كما يسمح الغرس بالتحكم الدقيق فى تركيز المادة الشائبة كما يمكن استخدامه لغرس أى نوع من الذرات فى أى نوع من المواد.

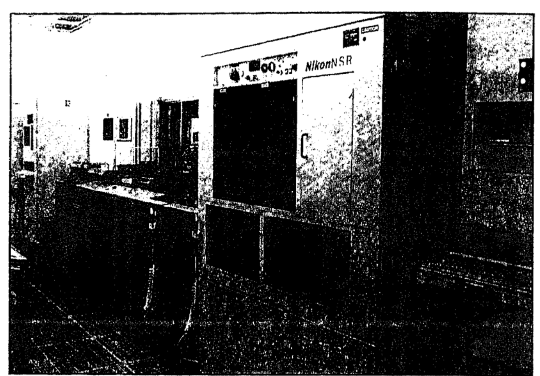
وفى تطور هام أمكن حديثا غرس جرعات كبيرة من ذرات الأكسجين بداخل السيليكون وبالتالى أمكن تكوين طبقة أوكسيد سيليكون SiO_2 فى عمق الرقاقة مما يفتح المجال لتكنولوچيا سيليكون فوق عازل (SOI) والتى تسمح بوجود عدة ملايين من النبائط فى دائرة متكاملة واحدة.

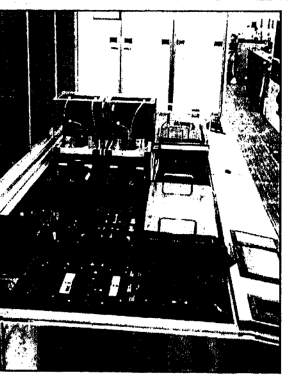
وأخيرا، وكما يتضح من الشكل (٤-٩) فإنه يمكن غرس بروفيل من الشوائب بسمك صغير جدا (أى ضئيل للغاية)، وبالتالى يمكن أن يحل الغرس الأيونى محل خطوة قبل الترسيب فى عملية الانتشار، ويمثل هذا حلا مثاليا لمشكلة تصنيع النبائط الحديثة التى تتطلب وصلات *pn* متناهية الضحالة.

٤-٢-٤ النقش الليثوجرافى (الحجرى) Lithography

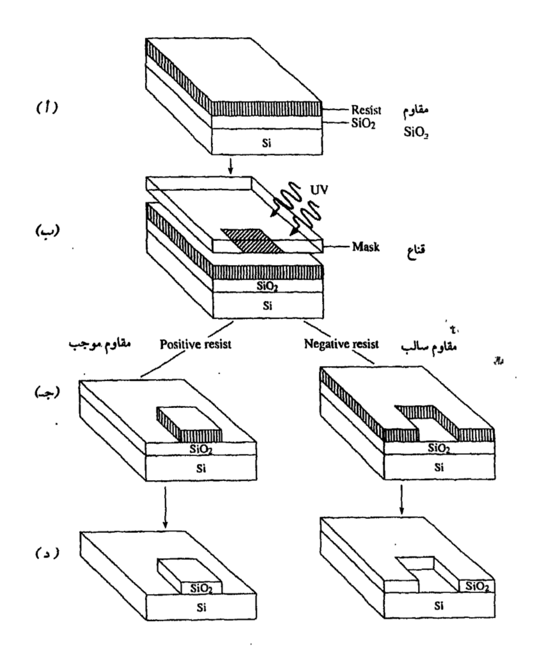
عند تعرضنا للانتشار والغرس الأيونى ذكرنا أن بعض المواد مثل أكسيد السيليكون يمكن استخدامها كقناع من غشاء رقيق على مناطق على سطح الرقيقة. النقش الليثوجرافى (الحجرى) عبارة عن إزالة مناطق معينة من هذا الغشاء الرقيق الذى يغطى سطح الرقيقة بغرض تكوين مناطق عازلة أو مناطق مغطاة بالمعدن أثناء صنع الدائرة المتكاملة. الصورة فى الشكل (٤-١٠) لخط إنتاج (محطة) نقش حجرى.

ويبين الشكل (٤-١١) الخطوات الرئيسية لعملية النقش الحجرى، فأولا يطلى سطح الرقيقة بطبقة من الأكسيد وفوقها يتم الطلاء بمادة حساسة للضوء فوق البنفسجى





شكل (٤-١٠) محطة نقش حجرى الجزء الأوسط بالصورة العلوية نظام الطلاء والتظهير.
الصورة السفلى النظام الأوتوماتيكى لإجراء عمليات الطلاء والتظهير والتصليد



شكل (٤-١١) الخطوات الرئيسية فى عملية النقش الحجرى : (أ) وضع المقاوم، (ب) تعريض المقاوم للضوء من خلال القناع، (جـ) بعد التظهير، (د) بعد إزالة الأكسيد والمقاوم

تسمى بالمقاوم الضوئى photoresist. عادة ما تكون هذه المادة علـى شكل سائل، بعد سقوط بضع قطرات من هذا السائل على سطح الرقاقة تدار الرقاقة حول محورها بسرعة كبيرة كافية لتغطية (طلاء) السطح بطلاء رقيق ومنتظم السمك. يلى ذلك تسخين الرقاقة

لزمن قصـير عند درجة حرارة منخـفضة نسبـيا (من 80 إلى 100 درجة مئـوية) بغرض تقوية التصـاق الطلاء بالسطح. ويشبه المقاوم الضـوئى عند جفافه طبقـة المستحلب التى نراها على فيلـم التصوير الفـوتوجرافى العادى. فى الخطوة التـالية يتم تعـريض المقاوم الضوئـى لضوء فوق بنفـسجى من خـلال «قناع» كمـا نرى بالشكل (٤-١١ ب). هذا القناع عبارة عن لوح تصوير من الزجـاج أو الكوارتز تم إعداده بعناية ليكون نسخة طبق الأصل من النسق المراد نقشه على طبقة الأكسيد. تحجب المناطق الداكنة لمستحلب القناع الضوء فوق البنفسـجى، وهكذا تتم إضاءة مناطق مختارة من طبـقة المقاوم الضوئى دون غيـرها. يحدث تغير كـيميائى للمناطـق المعرضة للضوء فـقط. وهنا لا بد من ذكر أنه يوجد نوعـان من المقاوم الضـوئى: موجب وسالب. فى النوع السـالب تتبلمـر المنطقة المعرضة للـضوء، وبالتالى سيصـعب إزالتها لاحقـا وتظل فى مكانها بعد إجـراء عملية التظهيـر التى سـتزيل المناطـق التى لم تتعرض للضـوء (انظر للجزء اليـمين فى الشـكل (٤-١١)) وعلى العكس من ذلك فإن المقاومات الموجبـة تحوى على مادة حساسة تبطئ من معدل ذوبان المقاوم بواسطة سائل التظهيـر القلوى، وبالتالى فالمناطق المعرضة للضوء فى المقاوم الموجب تتكسر مادتها الحساسة وهذا يعرضها للذوبان كما هو مبين فى الجانب الأيسر من الشكل (٤-١١). فى الدارات المتكاملة القديمة كان المقاوم السالب هو الأكثر شيوعا ولكن فى الدارات المتكاملة الحديثـة يتم استخدام المقاوم الموجب بدلا من السالب لما يوفره من أداء أفضـل فى نقش خطوط أقل سمكا، ومعروف أن الدارات الحـديثة لها أبعاد متناهية فى الصغر.

فى الخطوات المتبقـية يتم نسخ النسق المطلوب على غشاء الأكسـيد. وبعد إجراء عمليتى الإضاءة ثم التظهير يتم تحمـيض المقاوم مباشرة عند درجة حرارة 120 إلى 180 درجة مئوية لمدة 20 إلى 30 دقيقـة لتموية التصاقـه بسطح الأكسيد لكى يتحـمل عملية الحفـر اللاحقـة. بعد ذلك تستخدم مـادة مزيلة للأكسيد (مـثل فلوريد الهدروچين) من المناطق غير المحمية بطبقة المقاوم.

بعد أن يقوم المقاوم بوظيفته يتم التخلص منه إما بتـعريضه لسائل كيميائى خاص يعمل على انتفاخه ثم سقوطه أو بحرقه فى لهب (بلازما) غنى بالأكسچين يحيل المقاوم إلى رماد تسهل إزالته.

مع اتجاه أبعاد النبـائط للتصغير باستـمرار فإن نظم النقش الحجرى المعـتمدة على الضوء فوق البنفسجى قـد تم دفعها لحدودها القصوى، وذلك باستـخدام أطوال موجية أصغـر فأصغر والتـحايل على الصعوبات الـناشئة عن حيـود الضوء ذى الطول الموجى

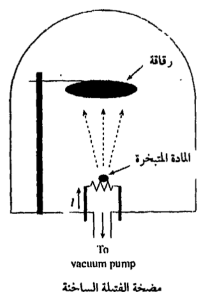
القصير بحيل تكنولوچية. لكن فى النهايـة لا بد وأن تتجه الصناعة للنظم المعتمدة على الأشعـة السينية أو الأشعـة فوق البنفسجـية EUV ذات الطول الموجى الأقصـر لملاحقة التصغير المستمر لأبعاد النبائط.

٤-٢-٥ ترسيب الطبقات الرقيقة Thin-Film Deposition

لكى يتم توصـيل قلب النبيطة «بالعـالم الخارجى» يلزم ترسيـب نسق من أسلاك منقوشة على طبقـة معدنية وفى الدارات الأكثر تعقـيدا قد يلزم وجود ثلاث أو أربع من هذه الطبقات المعدنية المعزولة عن بعضهـا البعض. العزل الكهربى يعنى ترسيب طبقات عازلة بالتبادل مع طبقات معدنية. وأخـيرا فلحماية النبيطة من غزو الذرات الغريبة التى قد تنتشر لداخلها وكذلك لعـزل المناطق الداخلية للدارة المتكاملة بعضها عن بعض يلزم ترسيب طبقـات سميكة من مادة عازلة. فيـما يلى سنعرض الطرق المستخدمـة لترسيب الطبقات المطلوبة.

التبخير Evaporation

التبخير طريقـة قديمة وبسيطة لترسيب الأغشية الرقـيقة. يوضع مصدر المادة المراد تبخيـرها بالقرب من سلك تسخين فى غـرفة مفرغـة من الهواء (انظر الشكل ٤-١٢). فمثلا لتبـخير الألومنيوم يوضع سلك قصير من الألومنيوم بجـوار فتيلة ساخنة أو داخل قارب من مادة التنجستين. أمام المصدر مباشرة نضع الركيزة substrate المطلوب ترسيب الغشاء على سطحها. بعد تفريغ الغرفة من الهواء يسـخن سلك التسخين كهربيا فتتبخر ذرات مادة المـصدر وتنتـقل للقاعـدة بسهـولة بسبب الضـغط المنخفض وتتـرسب على القاعدة.

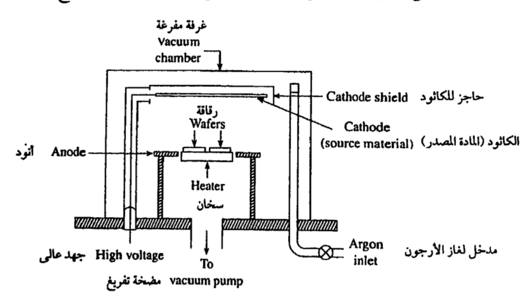


شكل (٤-١٢) تبخير الفتيلة الساخنة

يعيب طريقة التبخير تلوث الغشاء بذرات من مادة فتيلة سلك التسخين وللتغلب على هذه المشكلة ألغى سلك التسخين وتم تسخين مادة المصدر مباشرة بتعريضها لشعاع من الإلكترونات القوية. لكن يعيب هذه الطريقة أيضا انبعاث أشعة سينية ناتجة عن تصادم الإلكترونات بالمصدر، ووجد أن هذه الأشعة تتسبب فى ظهور عيوب فى بلّورة النبيطة؛ لذلك كله لا تستخدم طريقة التبخير فى خطوط إنتاج النبائط الحديثة ويقتصر استخدامها لإنتاج دارات النبائط البسيطة والتى لا تتأثر بعيوب هذه الطريقة.

النفث Sputtering

يتشابه النفث مع التبخير. وكلاهما يتم فى غرفة مفرغة حيث توضع مادة المصدر ومقابلها الركيزة (الرقيقة) على لوحين متقابلين بينهما فرق جهد كهربى عال (انظر الشكل ٤-١٣) أثناء الترسيب تفرغ الغرفة من الهواء ويتم إدخال غاز النفث (الأرجون عادة) تحت ضغط منخفض تتأين ذرات الأرجون بفعل الجهد العالى وتصير على هيئة بلازما. تتجه أيونات الأرجون الموجبة إلى لوح المصدر السالب وبعد تصادمها معه تخلع ذرات المصدر. تترسب هذه الذرات المخلوعة والمتعادلة كهربيا على الركيزة. فى حالة ترسيب المعادن يكون الجهد الكهربى مستمرا ولكن عند ترسيب المواد العازلة يلزم استخدام جهد متردد بتردد عال (RF). عند ترسيب مركب كيميائى معين قد يلزم استخدام عازل من نفس نوع المركب الكيميائى لتحسين التحكم فى نسب المكونات الكيميائية للغشاء المترسب. النفث هو الطريقة المثلى لترسيب الألومنيوم وغيره من المعادن؛ لأنه يعطى أغشية قليلة التلوث عند درجة حرارة منخفضة وبمعدل إنتاج مقبول.



شكل (٤-١٣) مخطط لنظام النفث dc المادة المصدر تغطى الكاثود بينما الرقاقة مركبة على نظام الأنود

الوصلات الدمشقية

أعلنت كل من شركة IBM، وموتورلا عام ١٩٩٨م أنهما تمكنتا من إنتاج رقائق بها ست طبقات من النحاس عوضا عن تقنية الألومنيوم السائدة حتى الآن. يتفوق النحاس على الألومنيوم فى التوصيل الكهربى لكن بعض الصعوبات والمخاوف من أن يؤدى استخدام النحاس إلى تلويث معدات التصنيع حالت دون استخدامه.

تم التغلب على هذه الصعوبات بعملية ذات مرحلتين، وسميت باسم عملية دمشق؛ لأن الدمشقيون القدامى تمكنوا من نقش خطوط معدنية على الزجاج عن طريق حفر أخاديد على سطح الزجاج ثم ملء هذه الأخاديد بالمعدن.

فى العملية الدمشقية الحالية يطلى النحاس كهربيا على سطح الرقيقة بعد حفر أخاديد عليها بالنسق المطلوب وفى مرحلة تالية يكحت النحاس الزائد كيميائيا وميكانيكيا مع ترك النحاس المترسب داخل الأخاديد. تحفر الأخاديد بواسطة نتريد التيتانيوم.

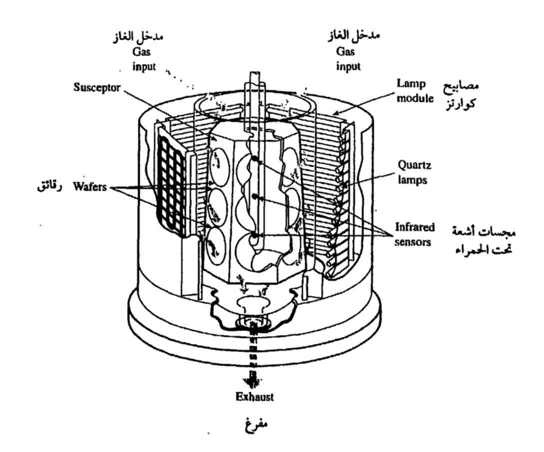
يمتاز النحاس بصغر مقاومته الكهربية عن الألومنيوم وبالتالى يمكن استبدال أسلاك الألومنيوم بأسلاك من النحاس أقل سمكا مما يؤدى إلى تحسين الأداء والإقلال من التكلفة؛ لأن سمك الأسلاك سيكون أقل، كذلك يؤدى السمك الأقل إلى سعة كهربية capacitance أصغر وهذا معناه دارات تعمل عند ترددات أعلى. وتشير التوقعات أنه بحلول عام ٢٠١٢م سوف يتم التمكن من تصنيع معالجات صغرية (دقيقة) بأبعاد تقل عن 0.05 ميكرون وسرعات تصل إلى عشرة جيجا هيرتز !!.

وربما يتقدم هذا الموعد عدة سنوات بعد أن تمكن فريق بحثى أمريكى فى أبريل ٢٠٠١م من تحقيق نقش حجرى بأبعاد 30 nm باستخدام أشعة فوق بنفسجية متناهية القصر (Extreme UV). للتحكم فى هذه الأشعة استخدمت مرايا وقناع عاكس مصنوع من 40 طبقة رقيقة من الموليبدنم والسيليكون على التوالى. أما الأشعة نفسها فأمكن إنتاجها من غاز زينون يتدفق بسرعة فوق صوتية وتستثار ذراته بضوء ليزر.

ترسيب التبخر الكيميائى Chemical Vapor Deposition

يتكون الغشاء الرقيق فى طريقة ترسيب البخر الكيميائى لغاز أو أحد مكونات هذا الغاز. وإما أن يتحلل المركب الغازى أو تتفاعل مكوناته لتكوين الغشاء. يتم تحفيز التفاعلات على سطح الرقيقة والذى يعترض سريان الغاز. (انظر الشكل ٤-١٤).

ترمز الحروف الثلاثة CVD إلى هذه الطريقة التى يمكن تنفيذها فى أجواء مختلفة أهمها هى :



شكل (٤-١٤) المفاعل المستخدم فى عمليات CVD وتثبت الرقاقات رأسيا وتسخن بضوء مصابيح الكوارتز. غازات المعالجة تدخل من أعلى مارة بالرقاقات وتخرج محوريا من أسفل

أ - فى الضغط الجوى العادى APCVD

حيث يرمز الحرفان AP إلى الضغط الجوى Atmospheric Pressure وتصلح طريقة ترسيب البخر الكيميائى تحت ضغط جوى عادى للنظم البسيطة.

ب- تحت ضغط جوى منخفض LPCVD

LP ترمز للضغط المنخفض. وتشبه الطريقة السابقة مع تحسين فى انتظام الغشاء كما أنها تستهلك غازات أقل.

جـ- التحسين بالبلازما

يتكون جو البلازما من إلكترونات نشيطة تعمل على تنشيط تفاعل الأبخرة دون اللجوء لرفع درجة الحرارة.

تستخدم طريقة الترسيب للبخر الكيميائى بصورة روتينية عند عمل الأقنعة وفى ترسيب الطبقات التى تعزل الطبقات المعدنية بعضها عن بعض فى الدارات المتكاملة المعقدة. كما أنها تستخدم فى تكوين طبقة السيليكون المتعدد والتى يمكن أن تؤدى وظيفة الطبقة المعدنية إذا تم تطعيمها بتركيز عال من الشوائب.

النمو المتراص Epitaxy

فى كل الطرق السابقة لا يمكن ترسيب الغشاء فى صورة بلّورية بل فى صورة متعدد البلّورة. الطريقة الوحيدة لتكوين غشاء بلّورى هى طريقة النمو المتراص وفيها يتم نمو بلّورة الغشاء على نفس نسق الشبيكة الموجودة تحت الغشاء. ومصطلح epitaxy يتكون من مقطعين معناهما بالإغريقية «الرص فوق».

فى هذه الطريقة يتم إمرار أبخرة من مركبات السيليكون (مثل تتراكلوريد السيليكون) على سطح الرقيقة كما في طريقة ترسيب البخر الكيميائى وكنتيجة للتفاعلات الحادثة تترسب ذرات السيليكون على نفس اتجاه البلّورة التحتية. وأثناء نمو السيليكون البلّورى يمكن تطعيمه بالشوائب عن طريق إدخال غازات حاوية للشوائب مثل الفوسفين PH_3 والدابورين B_2H_6 أو الزرنيخ (AsH_3) أثناء الترسيب.

ويجب استكمال النمو المتراص السابق لكل سطح الرقاقة قبل ترسيب أى أغشية مستديمة والتى تتم فى مرحلة لاحقة. ويجب ملاحظة أن الرقائق المستخدمة فى هذه الطريقة قد تشترى من موردى الرقائق وعليها طبقة الرص epi-layer مسبقا.

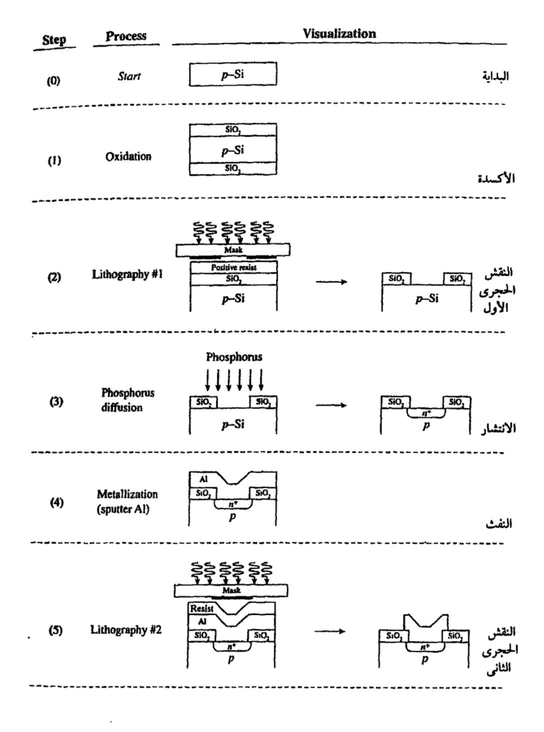
(٤-٣) الوصلة *pn* كمثال لتصنيع النبائط

***pn* Junction as Example for Device Fabrication**

نوضح فى هذا الجزء كيف يتم تسلسل العمليات المفردة التى ناقشناها سابقا من أجل إنتاج نبيطة نهائية. والمثال الذى سنعرضه هنا يتعلق بتصنيع وصلة *pn* وفيه سنعرض الخطوات الرئيسية دون الدخول فى تفاصيل هذه العمليات. هذه العمليات موضحة بالشكل (٤-١٥) وهى :

0- البداية رقاقة سابقة التنظيف ومستوية السطح ومصنوعة من السيليكون التام البلّورة الخالى من العيوب (خطوة «0» فى الشكل).

1- الأكسدة الحرارية وفيها يتم ضبط سمك طبقة الأكسيد ليسمح بالانتشار الانتقائى للشوائب فى المراحل التالية (الخطوة 1 فى الشكل).



شكل (٤-١٥) ملخص بالصور للخطوات الرئيسية لتكوين دايود وصلة pn

2- النقش الحجرى رقم (1) باستخدام مقاوم ضوئى موجب وقناع به فتحة لإزالة طبقة الأكسـيد فقط تحت الفتحة، وبالتالى تـكون هناك فتحة فى طبقة الأكسـيد لانتشار الشوائب تحتها (انظر خطوة (2) فى الشكل).

3- إدخال الرقائق لفرن ما قبل الترسـيب ثم إدخال لفرن إيلاج الفوسفور، يلزم وجود بعض الأكسجين للمساعدة فى فصل الفسفور من المركب الغازى المحتوى الفسفور (P_2OCL_3). انظر خطوة (3) فى الشكل. (للتبسيط تم إغفال رسم خطوة نقش حجرى لازمة لإنماء طبقة أكسيد مساعدة لعملية التطعيم الفسفورى).

4- نفث الألومنيوم لتوصيل النبيطة بالخارج على هيئة طـبقة رقيقة تغطى الرقيقة بالكامل. خطوة (4).

5- وأخيـرا خطوة نقش حجـرى لتحـديد مسارات الألومنيـوم وإزالة الزائد من الألومنيـوم تتبـعهـا خطوة تليين حـرارى عند درجة حـرارة أقل من 500 درجة مـئوية لتحسين الوصلة الكهربية بين الألومنيوم والطبقة n^+ تحته. خطوة (5).

بعـد ترسيب الألومنيـوم تصبح الدايودات الموجـودة على سطح الرقـيقة جـاهزة للعمل، ولكى تكون جـاهزة تجاريا تقطع الرقيـقة بمنشار له شفـرة من الماس إلى أجزاء صغـيرة يحـوى كل منها دايودا. يسمى جـزء الرقاقـة الذى يحوى نبيـطة كاملة أو دارة متكاملة بالقالب (die). ترسب تحت القالب أطراف توصيل معدنيـة كبيرة ويتم توصيل هذه الأطراف بنظائرها علـى سطح القالب، ثم توضع الـقوالب داخل كـبسـولات من البلاستيك القوى أو أغلفة معدنية محكمة الغلق.



الفصل الخامس

الوصلة الثنائية

The *pn* Junction



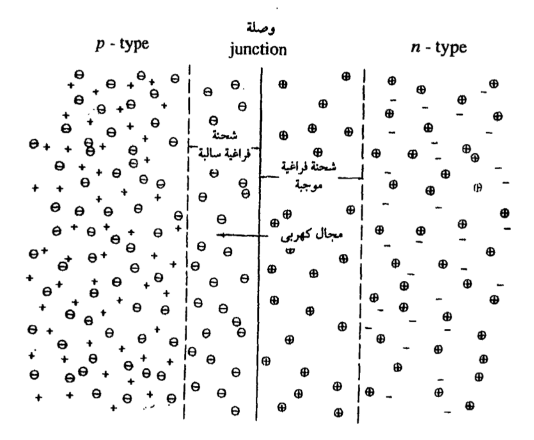
مقدمة:

الوصلة الثنائية pn هى حد فاصل داخلى ضمن بلّورة أحادية من مادة شبه موصل. على أحد جانبى هذا الحد n تكون فيه الغلبة للذرات المانحة بينما تكون الغلبة على الجانب الآخر p للذرات المتقبلة، شكل (٥-١). وهذه الوصلة هى أبسط نبائط أشباه الموصلات المعروفة.

والفهم الفيزيائى لأداء هذه الوصلة يعتبر أمرا بالغ الصعوبة، غير أنه يقود إلى الكشف عن طريقه عمل نبائط أخرى مثل:

أ - الثنائى الضوئى. ب- الثنائى باعث الضوء.

جـ- الثنائى متغير السعة. د - الترانسيستور ثنائى القطب.



شكل (٥-١) طبقات شحنات الفراغ داخل الوصلة pn وعلى جانبيها، وتولّد المجال الكهربى الداخلى نتيجة انتشار الشحنات الغالبة قرب الوصلة

⊕ أيونات شوائب مانحة، + شغرات حرة.

⊖ أيونات شوائب مستقبلة، - إلكترونات حرة

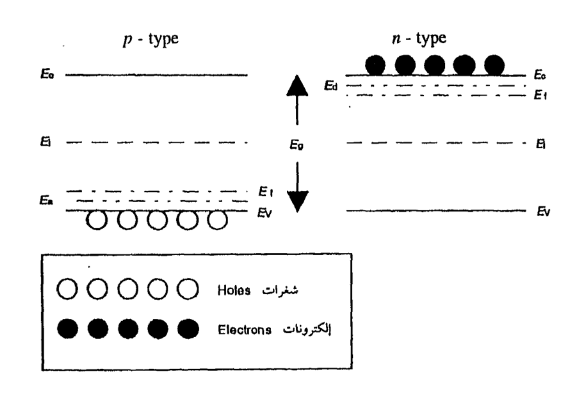
وعلى ذلك فإن دراسة عمل الوصلة الثنائية *pn* للتعرف على كيفية أدائها لوظيفتها يعتبر حجر الزاوية فى دراسة النبائط الإلكترونية.

(٥-١) الوصلة *pn* عند الاستقرار الحرارى :

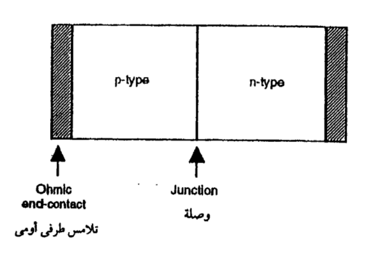
The *pn* Junction in Thermal Equilibrium

تكمن أهمية الوصلة *pn* فى عملها كمقوم للتيار الكهربى المتردد حيث تسمح بمروره فى اتجاه واحد فقط، وهى بذلك تمثل أبسط أنواع نبائط أشباه الموصلات ويطلق عليها بشكل عام تسمية الثنائى، وسوف نستخدم فى هذا الجزء تلك التسمية عند التحدث عن الوصلة *pn* ونبدأ بتصور نبيطة تستخدم كلا نوعى الشحنة الكهربية من الإلكترونات السالبة والشواغر الموجبة.

نعلم أن مخطط مستويات الطاقة تتشابه لأى من نوعى شبه الموصل *p* أو *n* وذلك كما يظهرهما شكل (٥-٢). لكننا نجهل ما قد يحدث عندما تتكون الوصلة *pn*، شكل (٥-٣).



شكل (٥-٢) مخطوط مناسيب الطاقة فى نوعى شبه الموصل



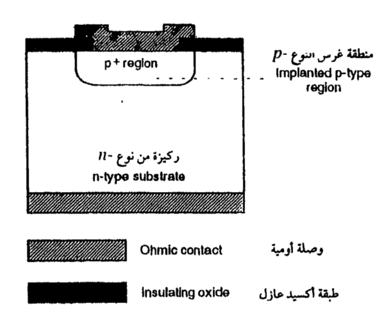
شكل (٥-٣) الوصلة pn بين نوعى شبهى الموصل p ، n والوصلة الأومية عند طرفى النبيطة

إذا أمعنا النظر هنيهة فى أمر هذه الوصلة نجـدها لا تتكون ببساطة بمجرد التصاق سطحى نوعى شبهى مـوصل السيليكون p، n ، وذلك لعدة أسباب منـها ما هو بسيط ومنها ما هو معقد وصعب ونوجز بعضها فيما يلى:

فمن الأسـباب البسيطة لعـدم اكتمال الوصلة بـالالتصاق الميكانيكى المباشـر عدم انتظام استواء السطوح، فتكون عدد نقاط الالتصاق التام قليلة جدا، وبذلك تختزل شدة التيار المار عبر الوصلة بدرجة كبيرة لعدم مروره عبر سطح الالتصاق بأكمله. إضافة إلى ذلك فـإن سطح السيليكون المعـرض للهـواء الجوى يتـغطى بطبقـة رقيـقة من أكـسيـد السيليكون وتعرف هذه بالأكسدة الذاتية وهى شديدة العزل الكهربى فتمنع مرور التيار.

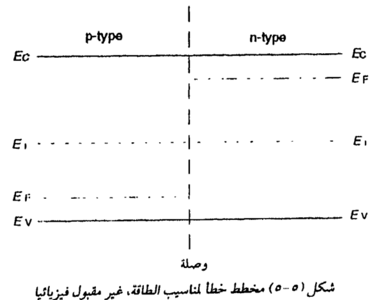
أما الأسبـاب المعقدة فتكمن فى الروابط الكيـمائية السائبـة عند السطوح فالبلّورة النقية من السيليكون لا تعانى بداخلها مشكلة عـدم تواؤم الروابط التساهمية نظرا لتماثل توزيع ذرات الجوار القريب بالنسـبة لأى ذرة معينة فى الشبيكة. أمـا ذرات السطح فإنها تفتقد لمثل هذا التماثل فيتولد عن ذلك أنواع غريبة من الروابط عند سطح البلّورة، وهذه بدورها تلصق ببعـض الشوائب من الهواء مع احـتمال تكون روابط سـائبة. . كل ذلك يؤدى إلى مشاكل فنية صعبة قد تفقد بها الوصلة خاصيتها.

فى الواقع يصنع الثنائى بحـيث تتكون الوصلة داخل جسم شـبه الموصل، بعـيدا عن السطح، شكل (٥-٤). يمكن التـعرف على ذلك بشىء من التـفصيل فى مـعرض الحديث عن طرق تصنيع أشباه الموصلات ونبائطها كما هو موضح بالفصل الرابع.



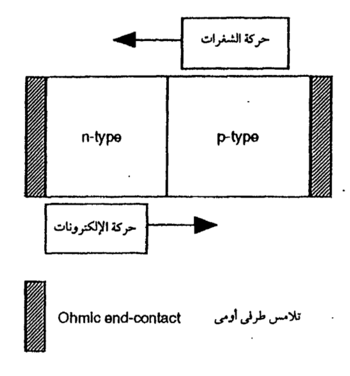
شكل (٥-٤) تصنيع الثنائى

إذا كان التصاق سطحى شبهى الموصل p، n أمرا بالغ الصعوبة من الناحية الفنية فإن التصــاق مخططى مستــويى طاقتيهــما على الورق يبدو أمرا سهــلا ونحصل به على شكل (٥-٥)، إلا أن المخطط الناتج يصبح غــير مقــبول من وجهة نظر الفــيزياء وذلك لعدم اتصال مستويى فرمى E_F على جانبى p، n وتولد هوة سحيقة بين مستوييهما عبر الوصلة، وبذلك يصبح مخطط الطاقة الممثل بشكل (٥-٥) مخططا غير سوى.



شكل (٥-٥) مخطط خطأ لمناسيب الطاقة، غير مقبول فيزيائيا

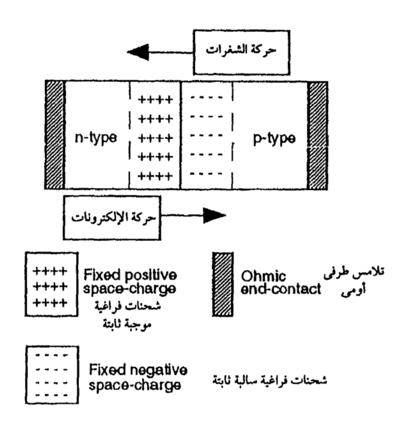
يمثل شكل (٥-٦) وصلة pn نموذجية تفصل بين جزئى شبه موصل السيليكون، أحدهما من النوع p والآخر من النوع n. يعرف الخط الفاصل بين النطاقين المختلفين بالوصلة الميتالورچية (الفلزية). ويصبح لدينا سيليكون ذات وفرة فى الشغرات الموجبة مع ندرة فى الإلكترونات فى تلامس مع سيليكون ذات وفرة فى الإلكترونات السالبة. تميل الشحنات المختلفة إلى إعادة الاتحاد فيما بينها عبر الوصلة ولا يقتصر الأمر على ذلك بل تنشأ هناك ظروف مناسبة لانتشار حاملات الشحنة الكهربية. حيث تميل كثير من الشغرات بالجانب الأيمن من الوصلة فى شكل (٥-٦) إلى الانتشار نحو الجانب الأيسر وكذلك تفعل الإلكترونات فى الاتجاه المضاد.



شكل (٥-٦) وصلة pn نموذجية

فى هذا النموذج المبسط للوصلة نحتاج إلى أن نفرق بين حاملات الشحنة من إلكترونات وشغرات موجبة من جهة وبين المانحات والمستقبلات المسئولة عنها من جهة أخرى، وهذه تمثل عناصر مثل الزرنيخ والبورون تطعم بها شبيكة السيليكون فتثبت عند مواضع معينة بداخلها. هذه المانحات والمستقبلات لا تتحرك إلا إذا تم تسخين شبه الموصل وتنشيط ظاهرة الانتشار. غير أن حاملات الشحنة الناتجة منها تنطلق فى حرية ويسر. وحين تنتشر الشغرات الموجبة تتجه نحو يسار الوصلة الفلزية لتعيد اتحادها

بالإلكترونات الموجـودة فى تلك الناحية فإنهـا تترك خلفها مـتقبلات من أيونات سـالبة الشحنة، وكذلك حين تنتشر الإلكترونات نحو يمين الوصلة تتـرك خلفها مانحات موجبة الشحنة. لا تسـتمر ظاهرة الانتـشار إلى ما لا نهـاية حيث تعمل هذه الأيونات الثـابتة بنوعيهـا على جذب حاملات الشحنة التى تحـاول الانتشار بعيدا. تسعى المتـقبلات إلى الاحتفـاظ بالشغرات كمـا تسعى المانحات إلى الاحتـفاظ بالإلكترونات. فيـعمل المجال الكهربى المتـولد من الشحنات الثابتة علـى أن يبطئ من عملية الانتشـار ويصل بها إلى حالة الاستقرار، ويبين شكل (٥-٧). حالة الاستـقرار الذى تئول إليه الوصلة وفيه تبين المنطقة بين الخطين المتـقطعين الرقعة التى غـادرتها حامـلات الشحنة الحرة تاركة خلفـها شحنات عارية تعرف بشحنات الفراغ، ومن ثم تعرف هذه المنطقة بمنطقة الشحنة الفراغية أو بمنطقة النضوب أو منطقة الاستنفاد، وذلك لكونها منطقة نضوب أو استنفاد الشحنات الحرة. أما بعيدا عن منطقة الوصلة *pn* تظل مادة شبه الموصل متعادلة.



شكل (٥-٧) توزيع الشحنات داخل وصلة pn مثالية عند حالة الاتزان الحرارى

فى حالة الاستقرار أو الاتزان تنعدم محصلة التيار الكهربى عبر الوصلة، على الرغم من تولد تيارات صغيرة فى كلا الاتجاهين، وتتلاشى بالتقائها مع تيارات انتشار معاكسة. وهكذا يكون هناك سريان لتيارات كهربية عبر الوصلة pn طوال الوقت، إلا أن محصلة التيار المار تكون صفرا.

وبفرض أن محصلة كثافة تيار الشغرات J_p، ومحصلة كثافة تيار الإلكترونات J_n فإنه يمكن صياغة معادلة وصفية على الصورة :

$$J_p = J_p\,(\text{drift}) + J_p(\text{diffusion}) = 0 \qquad \textbf{(5-1)}$$

تقدر وحدات J بالأمبير / سم٢، (A/cm^2).

يتولد تيار الانسياق J(drift) من تأثير المجال الكهربى عند الوصلة كما يتولد تيار الانتشار من التدرج فى تركيز الشوائب.

يمكن تمثيل العلاقة السابقة فى صورة رياضية بالمعادلة :

$$J_p = \mu_p\, p \frac{d E_F}{d\, x} = 0 \qquad (5\text{-}2)$$

حيث تمثل μ_p التحركية، p تركيز الشغرات الموجبة، E_F طاقة فرمى الذاتية على طول الإحداثى السينى x.

وبالنسبة لحاملات الشحنة السالبة تكون كثافة التيار.

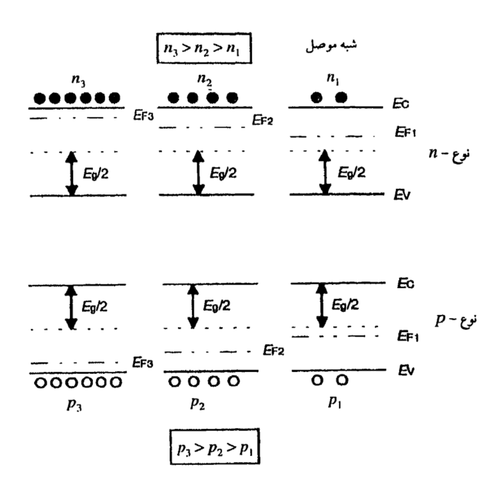
$$J_n = \mu_n\, n \frac{d E_F}{d\, x} = 0 \qquad (5\text{-}3)$$

وأى من العلاقتين تعطى :

$$\frac{d E_F}{d\, x} = 0 \qquad (5\text{-}4)$$

يعنى ذلك أنه فى اتجاه الإحداثى السينى تثبت قيمة طاقة فرمى ويمثل بخط أفقى فى مخطط الطاقة، ذلك عند انعدام محصلتى تيار الشغرات وتيار الإلكترونات عبر منطقة النضوب فى الوصلة pn.

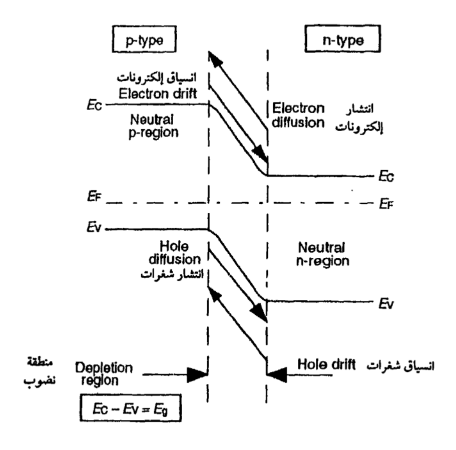
بداخل أى شبه موصل أياً كان نوعه p أو n فإن طاقة فرمى E_F تشغل مستوى واحد فقط، شكل (٥-٨). وعند تكون وصلة من شبهى موصل p، n وجب أن يكون



شكل (٥-٨) تغير موضع طاقة فيرمى مع تركيز حاملات الشحنة فى نوعى شبه الموصل n ، p

هناك أيضا مستوى واحد وثابت لطاقة فيرمى يمتد من المنطقة p إلى المنطقة n عبر الوصلة pn شكل (٥-٩). بذلك يتضح أنه للحصول على مخطط سوى لمناسيب طاقة الوصلة pn يجب إقحام مستويى طاقة فرمى فى شبهى الموصل p، n عند مستوى واحد ثابت وذلك بدلا من توحيد موضعى نطاقى التكافؤ ونطاقى التوصيل كما ورد من قبل فى شكل (٥-٥) كمخطط غير سوى لمناسيب الطاقة عند الوصلة. بعد توحيد مستويى طاقة فيرمى لنوعى شبه الموصل تترك مسافة أفقية فاصلة بينهما لتمثل منطقة النضوب (الوصلة) ثم يتم وصل نطاق التوصيل ونطاق التكافؤ داخل هذه المنطقة، مع مراعاة تساوى فجوة الطاقة بين نطاقى التوصيل والتكافؤ فى نوعى شبه الموصل. بذلك نحصل على المخطط السوى لمناسيب طاقة الوصلة pn.

سؤال: حاول رسم مخطط مناسيب الطاقة للوصلات المركبة (***npn***) و (***pnp***)، هذه الوصلات المركبة هى نبائط شبه موصل وتعرف بالترانزيستور.



شكل (٥-٩) مخطوط مناسيب الطاقة فى الوصلة pn

فى شكل (٥-١٠) يلاحظ وجود تيـارى الانتشار المتضادين وهـما يسريان طوال حياة الوصلة غير أن محصلتهمـا تساوى صفرا طالما كان هناك استقرار (اتزان) حرارى. إلا أنه عند غياب هذا الاتزان ووجـود فرق جهد كهربى بين طرفى النبـيطة يتغلب أحد هذين التـيارين على الآخر ونحـصل على تيار مـحصل واحـد فقط. فكما يـتضح من الشكل أن الإلكترونات وهى تنتشر من القطاع n إلى القطاع p تصطدم بحاجز جهد يميل على نطاقى التوصيل فى القطاعين. والإلكتـرونات الحرارية القليلة المتولدة فى القطاع p عند طبقة قـريبة من الوصلة تميل إلى أن تنزلق فى يسر إلى أسفل حاجـز الجهد المائل، وحين يكون هناك دفع لها فإنها تغوص فى الوصلة.

من جهة أخرى نجد عند نطاق التكافؤ أن الشـغرات الموجبة التى تنتشر من القطاع p إلى القطاع n تواجه هى الأخـرى حاجـز جهد مناظر. ومن اعـتبارات الـطاقة يكون حاجـز جهـد الشغرات مـضادا لحـاجز جهـد الإلكترونات، وكـذلك النذر اليسـير من الشغرات المتولدة فى القطاع n عند طبقة قريبة من الوصلة تُعجّل حركتها فى الاتجاه من

القطاع n إلى القطاع p بفعل المجال الكهربى الناشئ عن الشحنة الفراغية فى منطقة النضوب.

ونستعرض فى البند التالى هذه النقاط بشىء من التفصيل.

(٥-٢) ارتفاع حاجز جهد الوصلة pn

pn Junction Barrier Height

يقصد بحاجز الجهد المواجه للشحنات الحرة، الفرق بين مستويى نطاقى التوصيل فى نوعى شبه الموصل، كما يبينه شكل (٥-١٠). يرمز له بالرمز V_{bi}، وقد يعرف بالجهد المبيت للوصلة pn ويعطى بالعلاقة :

$$E_i = q V_{bi} \qquad (5\text{-}5)$$

حيث تمثل E_i المستوى الذى تحتله طاقة فيرمى فى شبه الموصل الذاتى، ومن ثم يطلق عليه مستوى طاقة فيرمى الذاتى. ويقع عند منتصف المسافة بين مستويى نطاق التوصيل والتكافؤ، حيث تُعطى قيمة الطاقة qV_{bi}، بحاصل جمع قيمتى الطاقة qV_n، qV_p.

ومن الشكل نجد أنه فى نطاق التكافؤ :

$$qV_p = -(E_i - E_f) \qquad (5\text{-}6)$$

وحيث إن تركيز الشغرات يُعطى بالعلاقة :

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_f - E_i}{kT}\right) \qquad (5\text{-}7)$$

حيث تمثل n_i تركيز حاملات الشحنة فى شبه الموصل الذاتى

∴ يمكن الحصول على :

$$\boxed{V_p = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}} \qquad (5\text{-}8)$$

وذلك بافتراض التأين الكامل لمستوى الذرات المتقبلة وعندها يكون تركيز الشغرات الموجبة p مساويا لتركيز الذرات المتقبلة N_A.

بالمثل نجد فى نطاق التوصيل :

$$qV_n = -(E_i - E_f) \qquad (5\text{-}9)$$

ويُعطى تركيز الإلكترونات بالعلاقة :

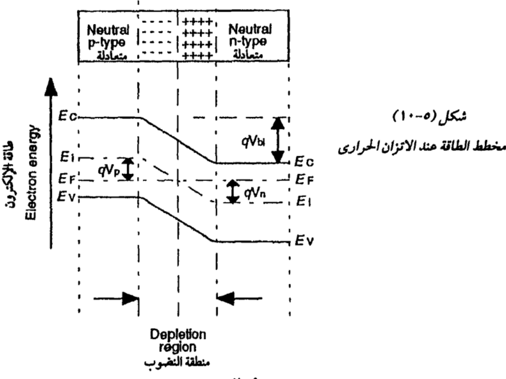
$$n = n_i \exp\left(\frac{E_f - E_i}{kT}\right) \qquad (5\text{-}10)$$

ومنها :

$$\boxed{V_n = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i}} \qquad (5\text{-}11)$$

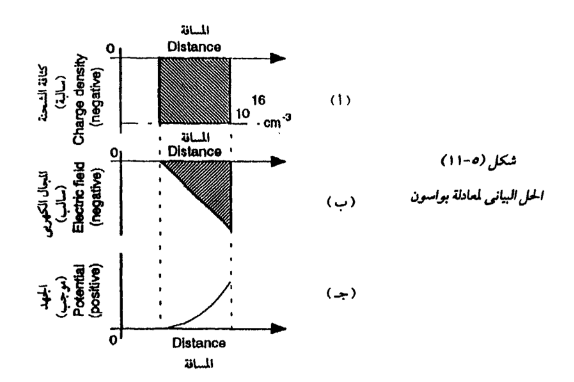
وذلك أيضــا بافتراض التـأين التام لمســتوى الذرات المانحــة وعندها يكون تركـيز الإلكترونات n مساويا لعدد الذرات المانحة N_D، وعليه تصبح :

$$\boxed{|V_{bi}| = |V_n| = |V_p| = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)} \qquad (5\text{-}12)$$



شكل (٥-١٠)

مخطط الطاقة عند الاتزان الحرارى



شكل (٥-١١)

الحل البيانى لمعادلة بواسون

مثال ٥-١ :

احسب الجهد الداخلى المبيت لوصلة *pn* إذا كانت تركيزات الإشابة هى $10^{18}/cm^3$ ذرة متقبلة فى شبه الموصل *p*، $10^{15}/cm^3$ ذرة مانحة فى شبه الموصل *n*.

الحل :

بالتعويض المباشر فى النتيجة النهائية لقيمة حاجز الجهد نجد :

$$V_{bi} = (0.0259) \quad ln \quad \left[(10^{18} \times 10^{15}) / (1.4 \times 10^{10})^2 \right].$$

$$= 0.76 \text{ V.}$$

هذه القيمة لا تعتبر معيارا ثابتا للوصلة *pn* كما جرى عليه العرف بل تتوقف على درجة إشابة المناطق *p*، *n* فى النبيطة. والآن وقد بدأنا التعرف على حاجز الجهد بين نوعى شبه الموصل، صار لزاما علينا أن نمعن النظر فى صور المجال والجهد الكهربى عبر الوصلة.

(٥-٣) تقريب النضوب والمجال الكهربى والجهد

Depletion Approximation, Electric Field and Potential

يرتبط المجال الكهربى وكذلك الجهد الكهربى عبر الوصلة، ارتباطا وثيقا بكثافة شحنة الفراغ المركزة فى طبقة النضوب فى منطقة الوصلة *pn*. بذلك تتحدد الشحنات الوحيدة التى سوف تأخذ فى الحسبان بتلك الشحنات العادية لأيونات الشوائب داخل طبقة النضوب أما باقى أجزاء شبهى الموصل *p*، *n* فهى فى حالة تعادل وخمود.

والعلاقة التى تربط بين كل من المجال الكهربى وكثافة الشحنة الكهربية تتميز بأهمية قصوى عند دراسة فيزياء أشباه الموصلات والنظرية الكهرومغنطيسية وتعرف بمعادلات ماكسويل. أحد هذه المعادلات :

$$\frac{\partial \mathcal{E}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{E}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{E}_z}{\partial z} = \frac{\rho}{\varepsilon_o} \qquad (5\text{-}13)$$

وهى معادلة تفاضلية ثلاثية الأبعاد، قد تختصر لبعد واحد فى الاتجاه السينى مثلا للتبسيط. تمثل $\mathcal{E}$ شدة المجال، ε_o سماحية الفراغ، وتمثل ρ كثافة الشحنة الكهربية. وفى مجال أشباه الموصلات فإنها تمثل كثافة شحنة الفراغ داخل طبقة النضوب. هذه المعادلة هى صورة لقانون جاوس الذى يربط بين كل من المجال الكهربى والجهد الكهربى بصورته التالية :

$$\mathcal{E} = -\left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z} \right) \qquad (5\text{-}14)$$

بذلك تصبح العلاقة بين الجهد الكهربى وكثافة الشحنة :

$$\boxed{\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_o}} \qquad (5\text{-}15)$$

تعرف هذه العلاقة بمعادلة بواسون. عندما تنعدم الشحنة $\rho = 0$ تصبح:

$$\boxed{\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0} \qquad (5\text{-}16)$$

وتسمى بمعادلة لابلاس.

عند دراسة أشباه الموصلات بهذه المعادلات يلزم استبدال سماحية الوسط ε بسماحية الفراغ ε_o وتصبح العلاقة (5-13) على الصورة

$$\frac{\partial \mathcal{E}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{E}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{E}_z}{\partial z} = \frac{\rho}{\varepsilon_o \, k_s} \qquad (5\text{-}17)$$

حيث تمثل K_s السماحية النسبية للوسط أو ثابت العزل للوسط.

لترجمة هذه المعادلات الرياضية المجردة إلى فيزياء بسيطة ملموسة نستعرض شكل (٥-١١) وفيه يبين الشكل (أ) توزيعا مستطيلا لكثافة الشحنة كما يظهرها شبه موصل ما فى ظروف معينة من شحنة سالبة بكثافة $10^{16} / cm^3$ ذرة إشابة. غير أن هذه الخصوصية لا تعنى شيئا عند مناقشة هذا الأمر. لاستنتاج شدة المجال الكهربى بدلالة الموضع علينا أن نجرى التكامل على كثافة الشحنة بالعلاقة :

$$\mathcal{E}_x = \frac{1}{\varepsilon_o \, K_s} \int \rho_x \, dx \qquad (5\text{-}18)$$

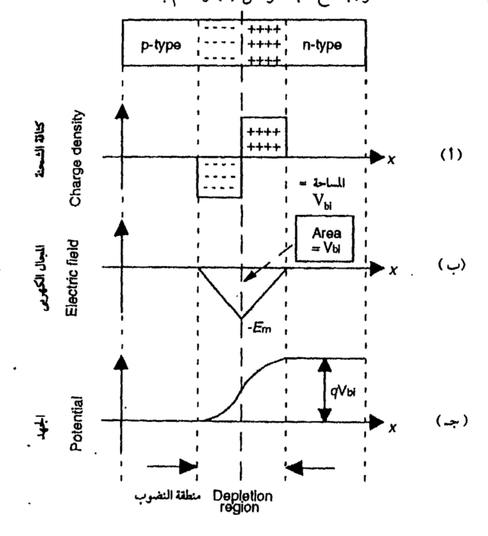
وذلك فى اتجاه الإحداثى السينى فقط. ودون الخوض فى عمليات رياضية يمكن تمثيل هذا التكامل بالشكل (ب). لاستنتاج قيمة الجهد نجرى التكامل على شدة المجال تبعا للعلاقة :

$$V = - \int \mathcal{E}_x \, dx \qquad (5\text{-}19)$$

ونحصل بذلك على الشكل (جـ).

هذه الكميات الفيزيائية المختلفة تتغير داخل طبقة النضوب عبر الوصلة pn بالمنحنيات الواردة فى شكل (٥-١٢). نرى فى الشكل وجود شبه موصل p يسار الوصلة الميتالورجية وشبه الموصل n على يمينها، فتكون الشحنات المكشوفة السالبة على يسار الوصلة والموجبة على اليمين منها. فى الحقيقة يستمر تناقص الشحنات المكشوفة، موجبةً كانت أم سالبة كلما بعدنا عن الوصلة وتضمحل بنهاية ذيلية داخل أشباه الموصلات بعيدا عن حدود الوصلة، خلال منطقة انتقال صغيرة للغاية حيث تنعدم الشحنات بعدها فى المنطقة المتعادلة من شبه الموصل.

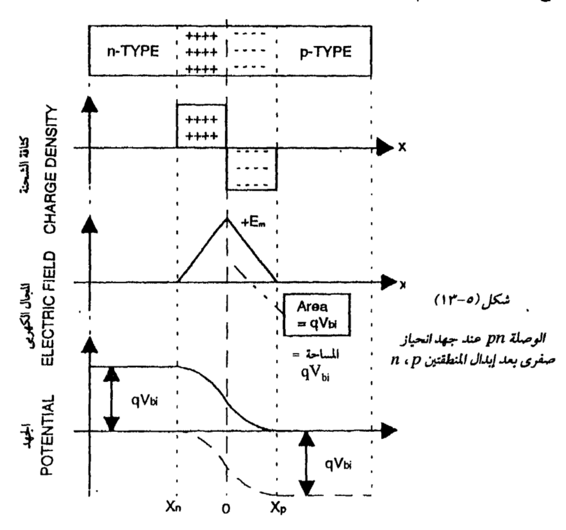
النموذج الموضح للوصلة pn في الشكل يبين انتقالا مفاجئا للشحنات من داخل الوصلة، حيث طبقة النضوب وفيها كثافة شحنة عالية إلى خارج الوصلة، حيث شبه الموصل المتعادل وفيها تنعدم كثافة الشحنة دون إظهار لمنطقة الاضمحلال. هذه صورة تقريبية مقبولة لطبقة النضوب وهو ما يطلق عليه تقريب النضوب. بداخل هذه المنطقة يتشكل كل من كثافة الشحنات الكهربية المختلفة والمجال الكهربى والجهد الكهربى الناتجين عن الشحنات بالمنحنيات التى بينها شكل (٥-١٢). إذا تحركنا بداخلها نحو اليمين من (p) إلى (n) نجد أن تكامل الشحنات السالبة يعطى شدة المجال بنفس إشارة الشحنة، حيث ينخفض إلى ما تحت الصفر في الاتجاه السالب حتى نصل إلى حد الوصلة الميتالورجية لنجد شحنات موجبة، يتغير بتأثيرها شدة المجال صوب الاتجاه المعاكس حتى يعود مرة أخرى إلى الصفر (القيمة الابتدائية) وذلك عند التقاء الحافة البعيدة لكثافة الشحنة الموجبة مع شبه الموصل (n) وتنعدم بعده الشحنات.



شكل (٥-١٢) الوصلة pn عند جهد انحياز صفرى

من تكامل المجال الكهربي نحصل على دالة الجهد سبب اختلاف الإشارة بين المجال والجهد نجد أن المجال السالب يؤدى إلى جهد موجب ونظرا لكون المجال سالبا على طول خط طبقة النضوب داخل الوصلة، يصبح الجهد موجبا داخل هذه المنطقة، مع ملاحظة أنه يمكن اختيار أى موضع كمرجع للقيمة الصفرية لدالة الجهد.

قد نستبدل موضعى شبهى الموصل عبر الوصلة فيكون النوع n على يسار الوصلة الميتالورچية والنوع p على يمينها. بذلك نحصل على منحنيات كثافة الشحنة والمجال والجهد كما يبينها شكل (٥-١٣). للمقارنة، نجد فى شكل (٥-١٢) أن المجال السالب يؤثر فى الاتجاه السالب للمحور السينى، فيعمل على سحب الشغرات ناحية منطقة p ودفع الإلكترونات ناحية منطقة n. بتعبير آخر يميل المجال فى هذه الحالة إلى استبقاء نوعى الشحنتين الحرتين كل فى مستقرها الطبيعى من شبه الموصل، هذا أمر طبيعى يتفق مع حالة الاتزان الناجم عن تأثير المجال فيتوقف أى تحرك إضافى للشحنات الحرة.



شكل (٥-١٣)

الوصلة pn عند جهد انحياز صفرى بعد إبدال المنطقتين p، n

ونشير هنا إلى أن موضع الإحداثى الصادى لمنحنى المجال يعطى مقدار شدة المجال، أما إشارته على هذا الإحداثى فإنه يبين اتجاه المجال عبر الإحداثى السينى، على ذلك فإن المجال فى شكل (٥-١٣) موجب القيمة والاتجاه فيتجه صوب الاتجاه الموجب للمحور السينى.

تكون بذلك القوة المؤثرة على الإلكترونات ناحية اليسار فيحتفظ بها شبه الموصل n، أما الشغرات فيدفعها هذا المجال ناحية اليمين جهة شبه الموصل p وهى نفس النتيجة المستخلصة من شكل (٥-١٢).

يبقى الحديث عن دالة الجهد فى شكل (٥-١٣) حيث تم تعريف قيمة الصفر للجهد عند الموضع $x = x_o$، إلا أن التكامل بصورته المعتادة يولد المنحنى المتقطع. وننوه بأنه ليس هناك أى فرق بين هذين المنحنيين، فما يهمنا من الجهد هو مقدار التغير الحادث فيه، أى فرق الجهد عبر الوصلة فقد يختار أناس آخرون الجهد الصفرى ليكون عند الوصلة الميتالورجية. هكذا نكرر ونؤكد أن تحديد موضع الجهد الصفرى أمر اختيارى بحت.

ومن طرائف هذه المنحنيات بأى من الشكلين (٥-١٢) أو (٥-١٣) أن مساحة المثلث الناتج من تغير شدة المجال عبر طبقة النضوب داخل الوصلة يعطى فرق الجهد V_{bi} بين طرفى الوصلة وهذه القيمة قد سبق تعريفها بحاجز الجهد.

وقبل أن ننهى هذا البند هناك نقطتان نود توضيحهما :

١- الوصلة pn التى نحن بصددها، تعرف بالوصلة شديدة الانحدار أو الفجائية. يتغير فيها تركيز الإشابة فجأة من النوع p إلى النوع n عند حد الوصلة الميتالورجية. غير أن هذا التغير الفجائى فى تركيز الإشابة غير مستحب. ويفضل عليه التغيير الهادئ المتدرج فى تركيز الإشابة. هذا بدوره يؤدى إلى تكوين وصلة مدرجة، لها تطبيقات كثيرة وخاصة فى مجال الترانزستور ثنائى الأقطاب.

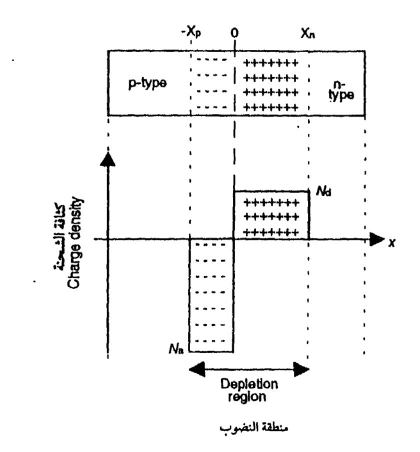
٢- الوصلة أحادية الجانب المبتورة، تتميز بتركيز إشابة عال جدا فى ناحية من الوصلة بالمقارنة بالناحية الأخرى، وسيرد الحديث عنها فيما بعد.

قد نشعر بالارتياح فترة وجيزة لأننا قد تعرفنا على بعض ما يحدث داخل الوصلة pn، الصغيرة جدا فى مسارها، الثرية فى خواصها الفيزيائية دون خوض يذكر فى معادلات رياضية معقدة. غير أننا نجد أنفسنا مضطرين إلى ركوب الصعاب والتعامل مع

بعض المعادلات الرياضية المزركشة برموزها المختلفة كى نتعرف بصورة أعمق على ما يجرى فى دهاليز هذه الوصله التى لا تدركها العين !!

(٥-٤) الصيغ الرياضية لعناصر الوصلة Mathematical Formulation

تقتضى عملية إعادة الالتحام بين الإلكترونات والشغرات المكونة لشحنة الفراغ فى منطقة النضوب- أن تبقى هذه المنطقة متعادلة كهربيا، ففيها يتعادل إلكترون واحد مع شغرة واحدة. فى شكل (٥-١٤) وجب أن تكون كمية الشحنات المكشوفة الموجبة على الجانب n من الوصلة الميتالورجية مساوية لكمية الشحنات المكشوفة السالبة على الجانب *p* من الوصلة. غير أن الشكل يظهر طولين مختلفين لامتدادى هاتين الشحنتين على الجانبين؛ وذلك تحقيقا لغرض اختلاف تركيزى الإشابتين على الناحيتين. وبوجه عام، يمكن التعبير عن تعادل منطقة شحنة الفراغ داخل طبقة النضوب بالصورة الرياضية التالية :



شكل (٥-١٤) تعادل شحنات الفراغ فى طبقة النضوب

$$N_A \ x_p = N_D \ x_n \qquad (5\text{-}20)$$

هذه العلاقة برغم بساطتها مفيدة جدا، إذ تخبرنا بأن منطقة الإشابة العالية التركيز عند أحد جانبى الوصلة تتميز بطبقة نضوب ضيقة. ويصبح عرض طبقة النضوب الكلية W مساويا لمجموع عرض طبقتى النضوب x_p ، x_n فى شبهى الموصل n ، p، أى أن:

$$W = x_p + x_n \qquad (5\text{-}21)$$

إذا تم اختيار نقطة الأصل مكان الوصلة الميتالورجية فإن معادلة بواسون، معادلة (5-15) تعطى :

$$\frac{d^2 V}{d x^2} = \frac{q N_A}{\varepsilon_{si}} \qquad (5\text{-}22)$$

عند $-x_p < x < 0$

كما تعطى :

$$\frac{d^2 V}{d x^2} = - \frac{q N_D}{\varepsilon_{si}} \qquad (5\text{-}23)$$

عند $0 < x \leq x_n$ ، حيث :

$$\varepsilon_{si} = \varepsilon_o \ K_s \qquad (5\text{-}24)$$

تمثل K_s السماحية النسبية لشبه الموصل وهى للسيليكون 11.9.

فى هذه المعادلات علينا أن نتوخى الحذر فى التعامل مع الإشارات. فى المعادلة (5-22) يكون التفاضل الثانى للجهد موجبا لارتباطه بالشحنات المكشوفة السالبة للمتقبلات (N_A)، بينما يكون سالبا فى المعادلة (5-23) لارتباطه بالشحنات المكشوفة الموجبة للمانحات. بإجراء التكامل على المعادلتين السابقتين نحصل على المجال الكهربى. فمن تكامل المعادلة (5-22) نجد :

$$\varepsilon_p (x) = - \frac{dV}{d x} = - \frac{q N_A x}{\varepsilon_{si}} + C_1 \qquad (5\text{-}25)$$

تمثل $\mathcal{E}_p$ شدة المجـال الكهربى جـهة p من الوصلة، C_1 ثابت التكامل ولتعـيينه نطبق الشروط الابتدائية وهى

عند $x = -x_p$ يكون $\mathcal{E}_p(x) = 0$

$$\therefore \ C_1 = -\frac{q N_A x_P}{\varepsilon_{si}} \qquad (5\text{-}26)$$

بالتعويض فى المعادلة (5-25) نجد :

$$\mathcal{E}_p(x) = \frac{q N_A}{\varepsilon_{si}} (x + x_p) \qquad (5\text{-}27)$$

بالمثل، من تكامل المعادلة (5-23) نحصل على شـدة المجال $\mathcal{E}_n(x)$ جهة شـبه الموصل n من الوصلة، فتكون :

$$\mathcal{E}_n(x) = \frac{q N_D}{\varepsilon_{si}} (x - x_n) \qquad (5\text{-}28)$$

رأينا فى التكامل الوصفى شكلى (٥-١٢ ، ١٣) أن النهاية العظمى لشدة المجال $\mathcal{E}_m$ تقع عند موضع الوصلة الميتالورجية $(x = 0)$. بتطبيق ذلك على النتيجتين $\mathcal{E}_p(x)$ ، $\mathcal{E}_n(x)$ نجد أن :

$$\boxed{\mathcal{E}_m = -\frac{q N_D x_n}{\varepsilon_{si}} = -\frac{q N_A x_p}{\varepsilon_{si}}} \qquad (5\text{-}29)$$

للحصول على الجهد الكهربى كدالة للموضع نجرى التكامل على معادلتى المجالين $\mathcal{E}_p(x)$ ، $\mathcal{E}_n(x)$. يئول ثابت التكامل فيها إلى الصفر إذا اعتبرنا أن الجهد الصفرى يقع عند خط الوصلة الميتالورجية $(x = 0)$. بذلك يُعطى تكامل المعادلة (5-27).

$$V_p(x) = \frac{q N_A x^2}{2 \varepsilon_{si}} + \frac{q N_A x_p}{\varepsilon_{si}} \qquad (5\text{-}30)$$

يبقى الجهد ثابتا فى المدى $x \leq -x_p$ ويساوى قيمـته المحسوبة عند $x = -x_p$ من العلاقة :

$$V_p(-x_p) = -\frac{q N_A x_p^2}{2 \varepsilon_{si}} \qquad (5\text{-}31)$$

بالمثل ، من المعادلة (5-28) يمكن حساب قيمة الجهد عند الموضع $x = x_n$ لتكون :

$$V_n\ (x_n) = -\ \frac{q\, N_D\, x_n^2}{2\, \varepsilon_{si}} \qquad (5\text{-}32)$$

يصبح فرق الجهد V_{bi} عبر الوصلة وهو ما عرف بحائط الجهد، على الصورة :

$$V_{bi} = V_n - V_p = \frac{q}{2\, \varepsilon_{si}}\ (N_A\, x_p^2 + N_D\, x_n^2) \qquad (5\text{-}33)$$

غير أنه يمكننا حساب قيمة حائط الجهد V_{bi} بدلالة النهاية العظمى لشدة المجال $\mathcal{E}_m$ والعرض الكلى W لطبقة النضوب بالاستعانة بأى من الشكلين.(٥-١٢، ١٣). ذلك بحساب مساحة المثلث الذى قاعدته W وارتفاعه $\mathcal{E}_m$ لنحصل على :

$$V_{bi} = \left| \frac{E_m\, W}{2} \right| \qquad (5\text{-}34)$$

للحصول على صيغة رياضية لعرض طبقة النضوب الكلية W يحتاج الأمر إلى تعيين قيمتى x_p ، x_n والتعويض بهما فى المعادلة (5-21). بالاستعانة بعلاقة تعادل الشحنات، معادلة (5-20)، يمكن إعادة صياغة المعادلة (5-33) كى تصبح على الصورة:

$$V_{bi} = \frac{q}{2\, \varepsilon_{si}}\ N_A^2\, x_p^2\ \left(\frac{N_A + N_D}{N_A\, N_D}\right) \qquad (5\text{-}35)$$

أو :

$$V_{bi} = \frac{q}{2\, \varepsilon_{si}}\ N_D^2\, x_n^2\ \left(\frac{N_A + N_D}{N_A\, N_D}\right) \qquad (5\text{-}36)$$

تعطى المعادلة (5-35) قيمة x_p، عرض طبقة النضوب فى الجهة p من الوصلة.:

$$x_p = \frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{2\, \varepsilon_{si}\ N_A\, N_D}{q\,(N_A + N_D)}} \qquad (5\text{-}37)$$

كما تعطى المعادلة (5-36) قيمة x_n ، عرض طبقة النضوب فى الجهة n من الوصلة :

$$x_n = \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{2\, \varepsilon_{si}\ N_A\, N_D}{q\,(N_A + N_D)}} \qquad (5\text{-}38)$$

من هاتين النتيجتين نحصل على

$$W = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\,\varepsilon_{si}\;(N_A + N_D)\,V_{bi}}{q\,N_A\;N_D}} \qquad (5\text{-}39)$$

مثال ٥-٢ :

احسب الجهد الداخلى المبيت (جهد التلامس)، وكذلك عرض طبقة النضوب لوصلة pn مبتورة إذا كانت درجات الإشابة الذرية هى $10^{17}\,/\,cm^3$ فى شبه الموصل p، $10^{15}\,/\,cm^3$ فى شبه الموصل n.

الحل :

لحساب جهد التلامس نستخدم المعادلة :

$$V_{bi} = \frac{kT}{q}\;ln\;\frac{N_A\,N_D}{n_i^2}$$

$$= (0.026)\;ln\left\{(10^{17}\times 10^{15})\,/\,(1.4\times 10^{10})^2\right\} = 0.7\;\;V$$

لحساب عرض طبقة النضوب نستخدم المعادلة (5-39) :

$$W = \sqrt{\frac{2\,\varepsilon_{si}\;(N_A + N_D)\,V_{bi}}{q\,N_A\;N_D}}$$

$$= \sqrt{\frac{(2)\,(8.854\times 10^{-14}\times 11.9)\,(1.01\times 10^{17})\,(0.7)}{(1.6\times 10^{-19})\,(10^{17})\,(10^{19})}}$$

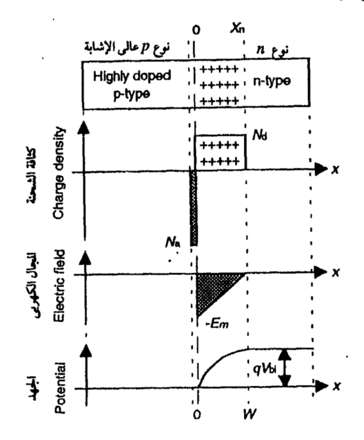
$$= \quad 2.65\;\times\;10^{5}\;\;cm\;=\;0.965\;\;\mu m$$

يبين لنا هذا المثال قيمة عرض طبقة النضوب فى ثنائى شبه الموصل وتقدر بحوالى واحد ميكرون أى $10^{-6}\,m$

(٥-٥) الوصلة pn أحادية الجانب

One-Sided Abrupt *pn* Junction

تتميز هذه الوصلة -كما ذكر من قبل- بدرجة إشابة عالية فى جهة واحدة فقط من جهتى الوصلة. يبين شكل (٥-١٥) نموذجا لها وتوزيعا لكثافة الشحنة والمجال الكهربى والجهد فيها بطريقة التكامل الوصفى بالرسم. ونظرا لزيادة درجة إشابة الذرات المتقبلة عنها للذرات المانحة فلقد افترض أن شحنة الفراغ كلها سوف تقبع ناحية المانحات فى الجهة n من الوصلة.



شكل (٥-١٥) الوصلة pn المبتورة وحيدة الجانب

فى واقع الأمر تكون هناك طبقة نضوب ضيقة جدا تمتد داخل الجهة p من الوصلة إلا أنها لا تظهر فى هذا الرسم التخطيطى، وعليه لا يظهر أثر للمجال الكهربى المناظر له فى الجهة p (هذا على الرغم من وجوده)، كذلك تم حذف الجزء المتناهى فى الصغر للجهد الكهربى الموجود جهة p.

هذا التبسيط فى الرسم هو فى الحقيقة تقريب يؤخذ به عند دراسة مثل هذه الوصلة. إضافة إلى ذلك هناك تقريب حسابى نجريه على المعادلات السابقة بغرض الوصول إلى خصائص هذه الوصلة من المعادلة

$$x_n = \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{2\,\varepsilon_{si}\; V_{bi}\; N_A\, N_D}{q\,(N_A + N_D)}} \qquad (5\text{-}40)$$

باعتبار $N_A >> N_D$ تئول هذه العلاقة إلى :

$$x_n = \sqrt{\frac{2\,\varepsilon_{si}\; V_{bi}}{q\; N_D}} = W \qquad (5\text{-}41)$$

وذلك للوصلة المبتورة أحادية الجانب.

كذلك عند تكامل المعادلة (5-23) نحصل على المجال الكهربى $\mathcal{E}_n$ فى الجهة n على هيئة :

$$\mathcal{E}_n(x) = \frac{q\,N_D\,x}{\varepsilon_{si}} + C_2 \qquad (5\text{-}42)$$

وتكون الشروط الابتدائية فى هذه الوصلة هى :

عند $x = 0$ يكون $\mathcal{E}_n(x) = -\,\mathcal{E}_m$

$$\therefore\; \mathcal{E}_n(x) = -\,\mathcal{E}_m + \frac{q\,N_D\,x}{\varepsilon_{si}} \qquad (5\text{-}43)$$

وعند $x = W$ ، تكون $\mathcal{E}_n(x) = 0$

يعطى هذا الشرط القيمة العظمى لشدة المجال بالعلاقة :

$$\mathcal{E}_m = \frac{q\,N_D\,W}{\varepsilon_{si}} \qquad (5\text{-}44)$$

بالتعويض عن هذه القيمة فى المعادلة (5-43) نحصل على :

$$\mathcal{E}(x) = \frac{q\,N_D}{\varepsilon_{si}}\,(x - W)$$

$$= -\,\mathcal{E}_m\left(1 - \frac{x}{W}\right) \qquad (5\text{-}45)$$

الجهد الكهربى ينتج من تكامل هذه المعادلة :

$$V(x) = -\int_{0}^{x} \mathcal{E}(x)\,dx = \mathcal{E}_m \left(x - \frac{x^2}{2W} \right) + C \qquad (5\text{-}46)$$

وبتطبيق الشروط الابتـدائية، حيث $V = 0$ عند $x = 0$، ينتج أن $C = 0$ ونحصل بذلك على :

$$V(x) = \frac{V_{bi}\,x}{W} \left(2 - \frac{x}{W} \right) \qquad (5\text{-}47)$$

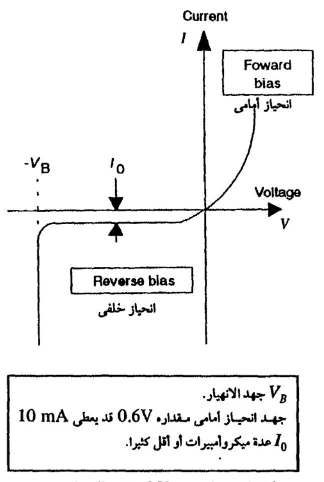
وبعد أن قـضينا هذا الوقت الطويل للتعـرف على خواص الوصلة *pn*، آن لنا أن نسلط عليها جهدا كهربيا انحيازيا ونرى ماذا يحدث لها.

(٥-٦) تطبيق جهد انحياز على الوصلة *pn*
Applying Bias to the *pn* Junction

يقصد بجهد الانحياز فرق الجهد الكهربى بين طرفى الوصلة *pn*. وهناك طريقتين لتطبيق جهد الانحياز. يمكننا توصيل القطب الموجب للمصدر الكهربى جهة شبه الموصل *n* أو جهة شبه الموصل *p* بالنسبة للوصلة ولكن، كيف يسرى التيار فى الثنائى فى هاتين الحالتين؟

يبين شكل (٥-١٦) منحنى مميـز للثنائى، يصف التغيـر فى شدة التيـار الكهربى المار بالوصلة *pn* مع فرق الجهـد عبرها. يتضح من الشكل أن التيار يسـرى بسهولة فى اتجاه واحد يعـرف بالانحيار الأمامى، بينما يعـانى مقاومة عاليـة فى الاتجاه المضاد الذى يطلق عليه الانحيار العكسى.

فى الانحيار الأمامى ترتفع قيمة التيار بشدة على هيئة دالة أسية مع زيادات طفيفة فى فرق الجهد، وفى الانحيار العكسى يسرى تيار ضئيل ذو قيمة ثابتة، يستمر إلى نقطة انهيار الوصلة. والسمـة الرئيسية للمنحنى المميز أن هناك تيـارا يسـرى ما دام هناك جهد انحيار عبر الوصلة.



V_B جهد الانهيار.
جهد انحياز أمامى مقداره 0.6V قد يعطى 10 mA
I_0 عدة ميكروأمبيرات أو أقل كثيرا.

شكل (٥-١٦) منحنى *I-V* المميز للوصلة *pn*

يظهر شكل (٥-١٧) نماذج للوصلة *pn* ومناسيب الطاقة المصاحبة لكلٍ فى حالات الاستقرار، عند غياب جهد الانحياز وفى وجود انحيار أمامى، ثم انحيار عكسى. وأهم ما يجب أن نعلمه هنا هو ما يحدث من إزاحة لشرائط الطاقة بفعل جهد الانحياز المؤثر عبر الوصلة. ولنستطرد فى وصف ما يتم فى تلك الحالات المختلفة.

أولا - حالة جهد الانحياز العكسى

يكون اتجاه الجهد الخارجى المؤثر (جهد الانحيار) فى نفس اتجاه الجهد الداخلى الناشئ عن شحنات الفراغ فى طبقة النضوب فتكون محصلة الجهد المؤثر عبر الوصلة *pn* هى مجموع هذين الجهدين. يؤدى هذا إلى مزيد من شحنات الفراغ فى طبقة النضوب فيزداد عرضها. بتعبير آخر، يعمل الجهد الذى أثرنا به على سحب المزيد من

الشغرات من الجهة p إلى الجهة n والعكس بالعكس (وهو ما يحدث بالفعل). يستمر مثل هذا الانتقال إلى أن ينمو الجهد المبيت فى طبقة النضوب إلى قدر كاف لإحداث الاتزان، وبديهى أن يزداد الجهد عبر الوصلة بالمقارنة بحالة الاتزان الحرارى؛ وذلك بسبب زيادة الشحنات ومن ثم زيادة شدة المجال.

عند فحص مخطط مناسيب الطاقة، نلحظ زيادة كبيرة فى زاوية ميل الجزء المنحدر منها عبر الوصلة. أما خارجها فتبقى مناسيب الطاقة مستوية فوق الأجزاء المتعادلة كهربيا فى الثنائى، حيث لا يتولد عليها فرق جهد يذكر لما لها من قدرة جيدة على التوصيل. من ثم يكون فرق الجهد الكلى مسلطا على طبقة النضوب، غير أن هذا لا يتحقق إذا كان شبه الموصل ذات إشابة طفيفة فتصبح له مقاومة عالية للتيار أو إذا أُمرّت تيارات كهربية عالية الشدة.

يتضح مما سبق أن جهد الوصلة pn يتعين من الجهد الخارجى مضافا إليه الجهد المبيت كما يوضحه الشكل. يرتفع بذلك حائط الجهد إلى ($V_{bi}+V_{appl}$).

ولكن، ما هى عاقبة ذلك على شدة التيار الكهربى المار ؟

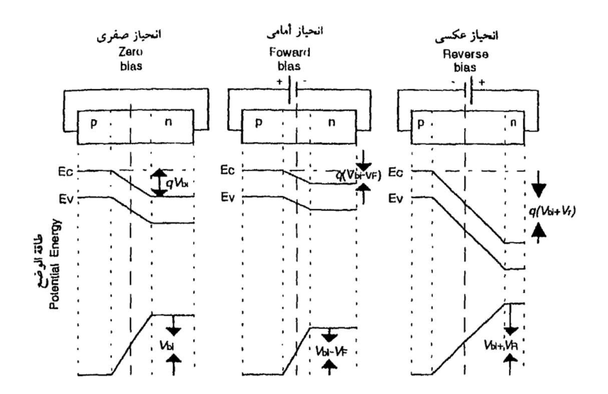
يتناقص تيار الانتشار من جراء حاجز الجهد المرتفع الذى يقوم بصد كل من الشغرات والإلكترونات فيعوق انتشارها. أما تيار الانسياق لا يتأثر بذلك كثيرا. القلة من الإلكترونات والشغرات المتولدة حراريا داخل طول الانتشار أو ما إلى ذلك عند حافة طبقة النضوب سوف تُجرف. فالإلكترونات المتولدة قريبا من طبقة النضوب على الجانب p من الوصلة سوف تُسحب خلالها، وكذلك الحال بالنسبة للشغرات المتولدة عند الجانب n.

إضافة إلى ذلك إذا شملت الرقعة المتسعة من طبقة النضوب بعض المراكز المولدة للشحنات مثل العيوب البلورية أو الشوائب فقد تظهر زيادة فى تيار الانسياق مع زيادة الانحيار العكسى.

وفى الحالة المثلى، يكون هناك سريان لتيار عكسى ثابت عند التأثير بانحيار عكسى ما، ويطلق على هذا التيار اسم تيار التشبع العكسى.

ثانيا - حالة جهد الانحياز الأمامى :

يمثل الجزء الأوسط من شكل (٥-١٧) الوصلة pn تحت تأثير جهد انحيار أمامى. فيه المجال الكهربى الخارجى يضاد المجال الداخلى الناشئ عن شحنات الفراغ فى طبقة النضوب. وباسترجاع التفسيرات السابقة نجد أن هذا يؤدى إلى انكماش كل من عرض



شكل (٥-١٧) تطبيق جهد الانحياز على الوصلة pn ، والترتيب من اليسار:
انحياز صفر - انحياز أمامى - انحياز عكسى

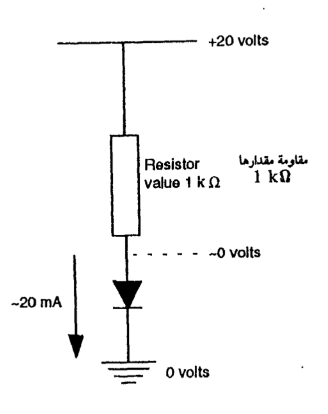
طبقة النضوب وارتفاع حاجز الجهد المواجه لكل من الإلكترونات والشغرات واختزال فرق الجهد الكهربى عبر الوصلة، فما هو تأثير هذه التغيرات على تدفق التيار الأمامى؟

فى الواقع لن يتأثر تيار الانسياق، حيث إن أيا من شحنات الأقلية بداخل طول الانتشار عند حافة طبقة النضوب تظل مسحوبة خلالها، ويحدث التغير الكبير مع تيارات الانتشار القادرة فى حينه على الانسياب.

فى الانحياز الأمامى يتم اختزال حاجز الجهد من V_{bi} إلى $(V_{bi} - V_{appl})$. بذلك نحصل على فيض هائل من تيارات الانتشار بالمقارنة بحالة الاتزان الحرارى وتظهر الزيادة المطردة بصورتها الأسية فى قيمة التيار الكهربى الأمامى عند زيادة جهد الانحيار الأمامى.

وإذا كان الأمر كذلك، ماذا يكون الحال إذا طبقنا على النبيطة جهدا كهربيا قدره 100 فولت؟ ونعلم أن الجهد الداخلى 0.6 فولت ! هل سينخفض نطاق الطاقة ويزاح لأعلى بمقدار 99.4 فولت ؟

هذه الرؤية الظاهرية تنبع من أننا نفكر فى الثنائى كمنظومة معزولة، وفى أى دائرة كهربية يصبح ضروريا توصيل مقاومة كهربية على التوالى مع النبيطة كى تُحد من شدة التيار المار بها. ففى الواقع لا يمكن تسليط انحياز أمامى بجهد 100 فولت على الثنائى؛ لأن بضع فولتات قليلة فقط فى الانحياز الأمامى سوف تسطح تماما مناسيب الطاقة وعندئذ لن يكون هناك عمليا ما يحد من تدفق تيارات الإلكترونات والشواغر المنتشرة كسيل جارف. هذه الحالة سرعان ما تولد حرارة عالية (تسخين جول)، تهدم



شكل (٥-١٨) دائرة كهربية بسيطة للثنائى على التوالى مع مقاومة مناسبة

الوصلة وتدمر النبيطة. يبين الشكل (٥-١٨) ما يجب أن تكون عليه الدائرة الكهربية التى تحوى الثنائى، فتحت تأثير انحيار أمامى تكون مقاومة الثنائى صغيرة جدا بالمقارنة مع قيمة المقاومة التى تُحد من شدة التيار. بدون هذه المقاومة يحدث تسطح نطاق الطاقة مع اندفاع تيار هائل فى الوصلة *pn* يدمر النبيطة ويحرقها.

نلخص الآن ذلك السرد الطويل فى سطور قليلة.

الانحياز الأمامى :

١- يختزل جهد الوصلة.

٢- يعزز انتشار الشغرات من الجهة p إلى الجهة n عبر الوصلة pn، وذلك مقارنة لما هو موجود فى حالة الاتزان الحرارى.

٣- يعزز انتشار الإلكترونات من الجهة n إلى الجهة p عبر الوصلة pn، وذلك مقارنة لما هو موجود فى حالة الاتزان الحرارى.

٤- تيار الانسياق يماثل ما هو موجود فى حالة الاستقرار.

٥- يتدفق فيض من تيار الانتشار الأمامى.

٦- تذكر أن الانحيار الأمامى يتطلب توصيل القطب الموجب لمصدر الجهد بالجهة p من الوصلة.

الانحياز العكسى :

١- يزداد جهد الوصلة.

٢- يختزل انتشار الشغرات من الجهة p إلى الجهة n عبر الوصلة pn، وذلك مقارنة لما هو موجود فى حالة الاتزان الحرارى.

٣- يختزل انتشار الإلكترونات من الجهة n إلى الجهة p عبر الوصلة pn، وذلك مقارنة لما هو موجود فى حالة الاتزان الحرارى.

٤- تيار الانسياق يماثل ما هو موجود فى حالة الاتزان.

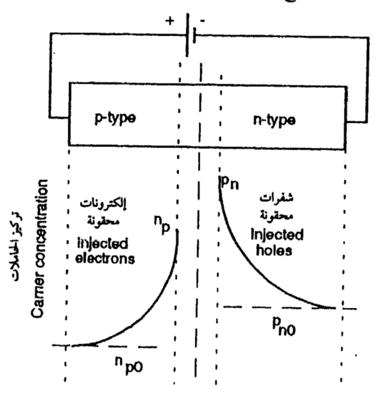
٥- يسرى تيار تشبع عكسى صغير للغاية.

٦- تذكر أن الانحياز العكسى يتطلب توصيل القطب الموجب لمصدر الجهد بالجهة n من الوصلة.

(٥-٧) التفسير الكيفى للانحياز الأمامى

Qualitative Explanation of Forward Bias

فى الانحياز الأمامى يتم خلال طبقة النضوب حقن أعداد غفيرة من الشغرات من الجانب p إلى الجانب n وفى ذات الوقت يتم أيضا حقن أعداد غـفيرة من الإلكترونات من الجانب n إلى الجانب p، كل ذلك عبر الوصلة، تحدث بذلك طفرة لحظية لشحنات الأقلية فتسعى للتعادل مع شحنات الأغلبيـة فى الجهات التى حقنت إليها، الفائض منها يأخذ فى الاضمحلال أسيا مع المسافة، شكل (٥-١٩).



شكل (٥-١٩) حقن الشغرات والإلكترونات عبر الوصلة pn

بمرور الوقت نحصل على بضـع أطوال انتشار لشحنات الأقـلية بعيدا عن حـافة طبقة النضوب، تنتهى هذه الشحنات إلى اتزان مع تركـيز شحنات الأقلية السائدة أصلا فى المادة المتعادلة.

إذن كيف يتأتى سريـان تيار ما بعد أن تعادلت شحنات الأقليـة المحقونة مع بحر متلاطم الأمواج من شـحنات الأغلبية المضادة خلال بضع أطوال انتشار من حـافة طبقة النضوب؟ للإجابة على ذلك علينا أن نأخذ فى الاعتـبار الملامسات أو الوصلات الأومية

عند طرفى النبيطة. فهى تدفع بأعـداد وفيرة من الشحنات تعوض بها شـحنات الأغلبية التى فُقدت عنـد تعادلها مع شحنات الأقليـة فى منطقة التعادل، بعـد أن كادت المنطقة تفقد تعادلها إثر عـمليات الالتئام خارج طبقة النضوب. يكون مجـموع أعداد الشغرات والإلكترونات المنسـابة عبر الوصلات الأوميـة مساويا لشدة التيـار الكهربى الكلى الذى ينساب فى الدائرة الخارجية.

بالرجوع إلى الشكل وإمعان النظر ناحية p من الوصلة، نجد أن معظم التيار يتم عن طريق مساهمـة الإلكترونات قرب حافـة طبقة النضوب، وحين نتـحرك إلى منطقة التعادل ثم إلى الطرف نجد أن التيار ينتقل بمساهمة أكثر وأكثر من الشغرات إلى أن نصل عند طرفى التلامس أو الوصلـة الأومية يكون التيـار كليا من الشغـرات. يحدث عكس هذا تماما ناحية المنطقة n من الوصلة، نجد التيار عند الوصلة الأومـية عند طرفها يكون كليا من الإلكترونات.

هكذا باتت الأمور معقدة، وأصبح التـعامل مع التوصيل الكهربى، ثنائى القطب كمن يتعامل مع أربع كرات فى الهواء يداعبها فى ذات الوقت. أليست لعبة شيقة ؟

(٥-٨) المعادلة المثلى للثنائى The Ideal Diode Equation

كى نحصل على صورة أكـثر وضوحا للوصلة pn علينا أن نقضى بعض الوقت فى صحبة المعادلات الرياضية المستأنسة التالية !

وفيها نفترض أن :

n_{no}	يمثل تركيز الإلكترونات عند حالة الاتزان فى شبه الموصل	n
n_{po}	يمثل تركيز الإلكترونات عند حالة الاتزان فى شبه الموصل	p
p_{po}	يمثل تركيز الشـــغرات عند حالة الاتزان فى شبه الموصل	p
p_{no}	يمثل تركيز الشـــغرات عند حالة الاتزان فى شبه الموصل	n

نعلم أنه فى شـبه الموصل الذاتى يعطى تركيـز حامـلات الشحنة n_i من حاصل ضرب تركيزى الشغرات p والإلكترونات n من العلاقة :

$$n \cdot p = n_i^2 \qquad (5\text{-}48)$$

بذلك نحصل فى الجهة n من الوصلة على :

$$n_{no} \cdot p_{no} = n_i^2 \qquad (5\text{-}49)$$

كما نحصل فى الجهة p على :

$$p_{po} \cdot n_{po} = n_i^2 \qquad (5\text{-}50)$$

باسترجاع معادلة الجهد المبيت (حائط الجهد) V_{bi} للوصلة فإنه يمكن كتابة :

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ ln \ \frac{n_{no}\, p_{po}}{n_i^2} \qquad (5\text{-}51)$$

بالتعويض من نتائج (5-49) ، (5-50) نحصل على :

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ ln \ \frac{n_{no}}{n_{po}} = \frac{kT}{q} \ ln \ \frac{p_{po}}{p_{no}} \qquad (5\text{-}52)$$

ومنها يمكن تعيين كل من n_{no}، p_{po} من المعادلات :

$$\boxed{n_{no} = n_{po} \exp \left(\frac{qV_{bi}}{kT}\right)} \qquad (5\text{-}53)$$

,

$$\boxed{p_{po} = p_{no} \exp \left(\frac{qV_{bi}}{kT}\right)} \qquad (5\text{-}54)$$

يمكننا الآن تطبيق هذه النتائج على الوصلة pn فى الثنائى، وذلك فى اتجاهى الانحياز الأمامى والعكسى، مع مراعاة أنه فى حالة الانحياز الأمامى يجب اختزال فرق الجهد عبر الوصلة إلى $(V_{bi} - V_F)$ حيث تمثل V_F قيمة الانحياز الأمامى. بالنسبة للانحياز العكسى يستبدل فرق الجهد عبر الوصلة بالقيمة $(V_{bi} + V_R)$ حيث يمثل V_R الانحياز العكسى. بهذه القيم من جهد الانحياز يضطرب تركيز حاملات الشحنة وتتغير قيمتها عند الاتزان إلى قيمة أخرى عند حالة اللا اتزان.

ففى حالة الانحياز الأمامى يصبح تركيز الإلكترونات عند انعدام الاتزان n_n ويعطى بالعلاقة :

$$n_n = n_p \exp \left\{ \frac{q\,(V_{bi} - V_F)}{kT} \right\} \qquad (5\text{-}55)$$

إذا قُدِّر لدرجة حقن شحنات الأقلية أن تبقى ضعيفة جدا بحيث لا تؤثر على حالة اتزان شحنات الأغلبية فإنه يمكن اعتبار :

$$n_n \simeq n_{no} \qquad (5\text{-}56)$$

،

$$p_p \simeq p_{po} \qquad (5\text{-}57)$$

بتعويض النتيجة (5-56) فى المعادلة (5-55) نحصل على :

$$n_{no} = n_p \exp \left\{ \frac{q\,(V_{bi} - V_F)}{kT} \right\} \qquad (5\text{-}58)$$

وبالتعويض عن قيمة n_{no} من المعادلة (5-53) ينتج :

$$n_p = n_{po} \exp \left(\frac{q\,V_F}{kT} \right) \qquad (5\text{-}59)$$

بطرح n_{po} من طرفى هذه النتيجة نحصل على :

$$\boxed{n_p - n_{po} = n_{po} \left[\exp \left(\frac{q\,V}{kT} \right) - 1 \right]} \qquad (5\text{-}60)$$

حيث تم استبدال (V) بقيمة (V_F).

بإجراء نفس هذه الخطوات يمكن الوصول إلى معادلة الشغرات وهى :

$$\boxed{p_n - p_{no} = p_{no} \left[\exp \left(\frac{q\,V}{kT} \right) - 1 \right]} \qquad (5\text{-}61)$$

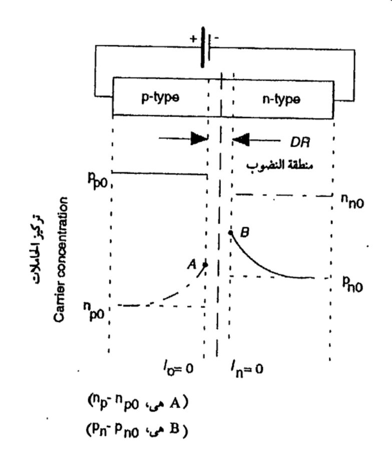
وفيها تم استبدال $(-V)$ بقيمة (V_R).

تعطينا المعادلات (5-60)، (5-61) قيمة فائض تركيز حاملات الشحنة من إلكترونات وشغرات على التوالى وذلك فوق قيمة الاتزان الحرارى لكل منها عند حافتى

منطقة النضوب ويمثلان النقطتين A، B فى شكل (٥-٢٠). ومن الأهمية بمكان معرفة أن هذا الفائض فى تركيز حاملات الشحنة الأغلبية هو الذى يهيئ القوة المحركة لعملية الانتشار ومن ثم سيرتبط بمعادلات الانتشار خلال السطور القليلة التالية.

يمثل شكل (٥-٢٠) عملية حقن حاملات شحنة الأقلية عبر منطقة النضوب فى نموذج لثنائى يعمل فى حالة انحياز أمامى. ولو بدأنا باعتبار منطقة التعادل جهة شبه الموصل p، يكون تركيز حاملات شحنة الأغلبية من الشغرات عند الاتزان الحرارى، p_{po} وتركيز حاملات شحنة الأقلية من الإلكترونات عند الاتزان الحرارى، n_{po}.

وعند التأثير بالانحياز الأمامى يتم حقن حاملات شحنة الأغلبية من الشغرات عبر منطقة النضوب لتبدو عند حافتها البعيدة على الناحية n كحاملات الشحنة «الأقلية» ويمثل تركيزها عند هذه الحافة بموضع النقطة B فى الشكل، كما يمكن حسابها من المعادلة (5-61).



شكل (٥-٢٠) فائض تركيز حاملات الشحنة الأقلية عند حافتى طبقة النضوب بالوصلة pn

ينتشر هذا العدد من حاملات الشحنة الأقلية في المنطقة الخالية من المجال عند شبه الموصل n ، مع اضمحلال في التركيز تجاه الوصلة الأومية أسيا، حتى تنتهي إلى تركيز الاتزان الحرارى p_{no}، ولتبسيط الشكل والحساب فقد تم اختيار نقطة أصل الجهة n عند الحافة اليمنى من طبقة النضوب.

ولو نظرنا الآن على الجانب n، يكون تركيز حاملات شحنة الأغلبية من الإلكترونات عند حالة الاتزان الحرارى n_{no}، وتركيز حاملات شحنة الأقلية من الشغرات p_{no}.

كذلك يتم حقن حاملات الشحنة الأغلبية من الإلكترونات عبر منطقة الوصلة من الجهة n إلى الجهة p لتبدو كحاملات الشحنة الأقلية، يمثل تركيزها عند الحافة اليسرى لطبقة النضوب بالنقطة A على الجانب p للنبيطة. وأيضا قد تم هنا اختيار نقطة أصل الجهة p عند الحافة اليسرى لطبقة النضوب. كل ذلك يحدث بتسليمنا بمبدأ استمرارية التيار الكهربى، حيث يفترض أنه لا توجد مصادر ثانوية أو مستودعات لتيارات ما داخل طبقة النضوب.

يتحدد اضمحلال تركيز حاملات الشحنة الأقلية من العلاقات التالية :

على الجانب p من الوصلة :

$$\delta n\,(l_p) = \delta n\,(0)\ \exp\ \left(-\frac{l_p}{L_n}\right) \qquad (5\text{-}62)$$

وعلى الجانب n :

$$\delta n\,(l_n) = \delta p\,(0)\ \exp\ \left(-\frac{l_n}{L_p}\right) \qquad (5\text{-}63)$$

حيث :

$$\delta n = n_p - n_{po} \qquad (5\text{-}64)$$

$$\delta n = n_p - n_{po} \qquad (5\text{-}65)$$

$$\boxed{\delta n\ (0) = n_{po}\exp\ \left\{\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right\}} \qquad (5\text{-}66)$$

$$\boxed{\delta p\ (0) = p_{no}\exp\ \left\{\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right\}} \qquad (5\text{-}67)$$

حيث الإزاحة عند حافة طبقة النضوب، فى المنطقة p = l_p، وفى المنطقة n = l_n.

لاستخلاص قيمة كثافة التيار الكهربى الكلى J علينا أولا إيجاد قيمتى كثافتى تيارى الإلكترونات J_n والثقوب J_p ثم جمعهما معا.

تعطى كثافة تيار الإلكترونات بالعلاقة:

$$J_n = q\ D_n\ \frac{dn}{dx} \qquad (5\text{-}68)$$

حيث يمثل D_n معامل انتشار الإلكترونات ووحداته $(m^2\,s^{-1})$، ويمثل (dn/dx) تدرج التركيز فى الاتجاه السينى للإحداثيات.

بإجراء التفاضل على المعادلة (5-62)، ثم التعويض فى المعادلة (5-68) نحصل على كثافة فائض حاملات الشحنة «الأقلية» من الإلكترونات على الصورة :

$$J_n\ (l_p = 0) = -\ \frac{q\,D_n\,n_{po}}{L_n}\ \left[\ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\ \right] \qquad (5\text{-}69)$$

تعنى الإشارة السالبة فى هذه المعادلة أن تيار الإلكترونات يكون فى الاتجاه المعاكس لاتجاه زيادة الإزاحة l_p، أى يكون فى الاتجاه الموجب لمحور السينات.

كذلك تتعين كثافة فائض حاملات الشحنة «الأقلية» من الشغرات بالعلاقة :

$$J_p\ (l_n = 0) = -\ \frac{q\,D_p\,P_{no}}{L_p}\ \left[\ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\ \right] \qquad (5\text{-}70)$$

ويكون هذا التيار صوب الاتجاه الموجب للمحور السينى أيضا.

نحصل بذلك على الشدة الكلية لكثافة التيار الناتج عن حركتى الإلكترونات والشغرات ويسرى فى النبيطة على الصورة :

$$J = q\ \left(\frac{D_p\,p_{no}}{L_p} + \frac{D_n\,n_{po}}{L_n}\right)\left(\ \exp\left[\frac{qV}{kT}\right] - 1\ \right) \qquad (5\text{-}71)$$

وبتعريف الكمية :

$$J_o \equiv q\ \left(\frac{D_p\,p_{no}}{L_p} + \frac{D_n\,n_{po}}{L_n}\right)$$

يمكن اختزال المعادلة (5-71) إلى :

$$J = J_o \left(\exp\left[\frac{qV}{kT} \right] - 1 \right) \tag{5-72}$$

إذا تم ضرب طرفى هذه المعادلة فى مساحة مقطع الثنائى، تصبح شدة التيار :

$$I = I_o \left(\exp\left[\frac{qV}{kT} \right] - 1 \right) \tag{5-73}$$

حيث التيار العكسى

$$I_o = qA \left(\frac{D_p p_{no}}{L_p} + \frac{D_n n_{po}}{L_n} \right)$$

تمثل هذه النتيجة المعادلة المثلى للثنائى فى حالة الانحياز الأمامى، وتصلح أيضا للانحياز العكسى إذا تم عكس إشارة V وأصبحت $qV > kT$ ، فتصبح $\exp(-\infty)=0$، وتئول شدة التيار إلى :

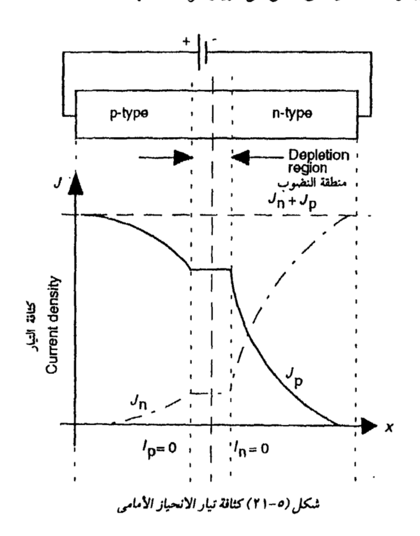
$$I = - I_0 \tag{5-74}$$

وهى قيمة تيار التشبع العكسى، كما يوضحها المنحنى (I-V) المميز للثنائى.

فى هذا الاستنتاج افترض أن قيمة كثافة تيار الإلكترونات واحدة عند حافتى طبقة النضوب، وكذلك بالنسبة لكثافة تيار الشغرات، يتضح ذلك فى شكل (٥-٢١) بالخطين الأفقيين عبر طبقة النضوب. أحدهما (السفلى) لتيار الإلكترونات والآخر لتيار الشغرات، هذا الفرض يحقق مبدأ استمرارية التيار الكهربى عبر منطقة النضوب دونما يكون هناك توليد إضافى أو التئام للشحنات بداخلها. وهذا يعنى عبور كل الشحنات المحقونة دون فقد. يلاحظ أيضا بالشكل ثبات قيمة الكثافة الكلية لشدة التيار ($J_n + J_p$) المار عبر الثنائى، هذا على الرغم من اضمحلال كثافة حاملات الشحنة «الأقلية» أسيا بالابتعاد عن حافتى منطقتى النضوب، إلا أن حاملات الشحنة «الأغلبية» تزداد أسيا فى هذا المدى فيؤدى جمع هاتين الكثافتين عند أى لحظة إلى ثبات قيمة التيار.

يبين شكل (٥-٢٢) كلا من كثافة حاملات الشحنة وكثافة التيار الكلى خلال الثنائى تحت تأثير الانحيار العكسى. ويظهر بجلاء الاتساع الشديد لطبقة النضوب فى هذه الحالة. الانحيار العكسى يعوق انسياب تيارات الانتشار الأمامى ويستخلص كل من تيار الأقلية للشغرات من الجهة n وتيار الأقلية للإلكترونات من الجهة p. ويكون المجال الكهربى قرب منطقة الوصلة شديدا بدرجة كافية لأن يقتلع عبر الوصلة كافة تيارات الندرة التى تولدت حراريا داخل المدى المكافئ لأطوال الانتشار L_p ، L_n من حواف طبقة النضوب. هذا السريان لتيارات الأقلية عبر الوصلة يُكَوِّن تيار التشبع العكسى.

تزداد قيمة تيار التشبع العكسى بزيادة درجات حرارة النبيطة بشكل لا يعتمد على قيمة الانحـيـاز العكسى بفرض عدم وجود مراكـز مشحونة داخل الرقعة الواسـعة لطبقة النضوب وبشرط أن نكون فى مأمن من انهيار الوصلة ذاتها.



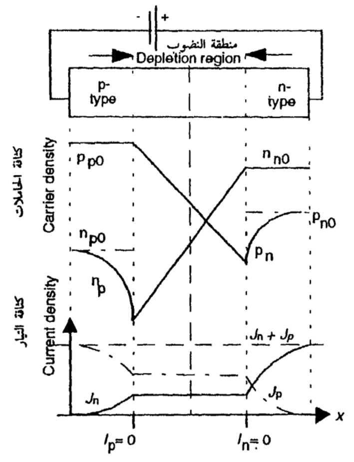
شكل (٥-٢١) كثافة تيار الانحياز الأمامى

مثال ٥-٣ :

احسب فرق الجهد الأمامى عبر طرفى وصلة *pn* لثنائى مثالى، عند درجة حرارة الغرفة وشدة تيار أمامى قدره 15 mA إذا كان شدة تيار التشبع العكسى يعطى بالقيم :

(أ) $5\,\mu A$ (ب) 8 pA

وإذا تم قـياس هاتين القـيـمتين للتـيار الـعكسى فى ثنائيين لهـما نفس الأبعـاد الظاهرية. بيّن أى التيارين يكون لثنائى السيليكون وأيهما لثنائى الجيرمانيوم.



شكل (٥-٢٢) الوصلة *pn* فى حالة انحياز عكسى

الحل :

لحساب فرق الجهد الأمامى نستخدم العلاقة :

$$I = I_o \exp \left\{ \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right\}$$

ومنها :

$$V_F = \left(\frac{kT}{q} \right) ln \left(\frac{I}{I_o} + 1 \right)$$

باعتبار قيمة شدة التيار العكسى المعطاة فى (أ) تصبح :

$$V_F = 26 \times 10^{-3} \quad ln \left(\frac{15 \times 10^{-3}}{8 \times 10^{-6}} + 1 \right) = 0.2 \text{ V}$$

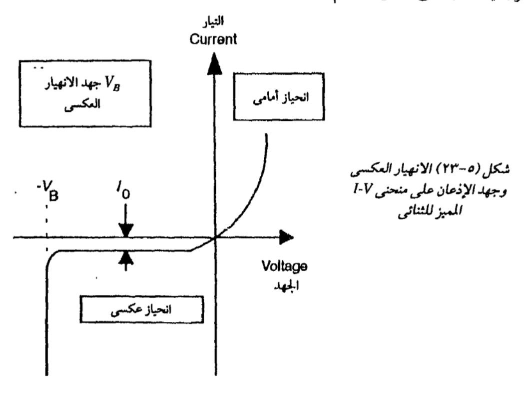
وباعتبار القيمة عند (ب) تصبح :

$$V_F = 26 \times 10^{-3} \quad ln \quad \left(\frac{15 \times 10^{-3}}{8 \times 10^{-12}} + 1 \right) \quad = 0.53 \text{ V}$$

للإجابة عن الجزء الثانى، نعلم أن تيار التسرب العكسى ينشأ عند كسح مجال الوصلة pn إلى داخلها حاملات الشحنة الأقلية المولدة حراريا قرب حواف منطقة النضوب. كلما صغرت فجوة الطاقة فى شبه الموصل زادت شحنات الأقلية المولدة حراريا، وعليه فالتيار العكسى ذو القيمة الأكبر يكون من نصيب ثنائى الجيرمانيوم لتميزه بفجوة طاقة قدرها 0.7 eV بينما تكون فجوة الطاقة فى السيليكون 1.1 eV .

(٥-٩) الانهيار العكسى Reverse Breakdown

يبين شكل (٥-٢٣) ما يحدث للمنحنى I-V المميز للوصلة pn فى ثنائى شبه الموصل عند التأثير بجهد انحياز عكسى كبير. إذا لم تكن هناك على التوالى مع النبيطة مقاومة كهربية مناسبة تُحدّ من شدة التيار، فقد نصل إلى قيمة من جهد الانحياز العكسى، تعرف بجهد الإذعان (الاستسلام) تنهار عندها الوصلة pn ويُدمَّر الثنائى. وتصنع بعض الثنائيات خصيصا بحيث يكون لها جهد إذعان نوعى لتستخدم كثنائيات مرجعية للجهد فى دوائر التحكم.



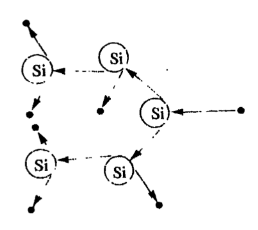
شكل (٥-٢٣) الانهيار العكسى وجهد الإذعان على منحنى I-V المميز للثنائى

تعتمد آلية الانهيار على نوع الثنائى ففى الوصلة pn دات الإشابة العالية تعرف هذه الآليـة بانهيـار زينر، تحدث عند انحـياز عكسـى قدره 5V أو أقل وإذا انخفض مستوى الإشـابة تعرف آلية الانهيار بالانهمار الإلـكترونى، وتستخدم كثنائيات مـرجعية للجهد العالى.

نوجز فيما يلى وصفا لآليات الانهيار المشار إليهما :

(أ) الانهمار الإلكترونى Electron Avalanch

يحدث بسـبب الزيادة المطردة فى شدة المجال، الـناجمة عن الانحـياز العكسى. وفيها يكتـسب الإلكترون طاقة كافية يصطدم بها مع ذرة مـا فى الشبيكة ويؤينها، يندفع إثر ذلك إلكترون التكافـؤ المنفصل من شريط التكافـؤ إلى شريط التوصيل بينمـا يتزاوج الإلكترون المصطدم مع الشـغرة الموجبة مكونا وحـدة متماسكة تعـرف بزوج الإلكترون والشغـرة، يتسارع بدوره ليـتصادم مع الذرات ويخلّف العـديد من إلكترونات وأزواج. تعرف هذه الآلية أيضا بالتأين التصادمى، شكل (٥-٢٤).



شكل (٥-٢٤) الانهمار الإلكترنى بالتصادم الايونى

(ب) انهيارزينر Zener Breakdown

على النقيض من الانهمـار الإلكترونى يحتاج هذا الانهيار إلى مسـتوى إشابة عال فى الوصلة pn. بذلك تصبح طبقة النضوب صغيرة جدا. يتولد فيها مجال كهربى شديد للغاية حتى دون انحياز مؤثر؛ لهذا السبب نكون فى حاجة إلى انحيار عكسى صغير كى نرفع المجال إلى الحد الكافى لنزع الإلكترونات من نطاق التـكافؤ، ويحدث هذا الانهيار عند جهود منخفضة تقل عن 5V.

مثال ٥-٤ :

ارسم شكلا تخطيطيا لتغيـر شدة المجال الكهربى فى وصلة pn عند حالة الاتزان الحرارى، إذا كانت درجة الإشابة الذرية 10^{15} / cm^3 فى كل من ناحيتى الوصلة.

بين أيضا بالرسم كيف يـتغير هذا المجال مع زيادة الانحـياز العكسى. ثم احسب النهاية العظمى لشدة المجال عند الوصلة إذا كان الثنائى من السيليكون وطبق عليه انحياز عكسى قدره 150 V يمكن إهمال الجهد الداخلى.

ما هو جهد الإذعـان لهذا الثنائى إذا جاء انهيار الوصلة عند مجـال كهربى شدته 10⁵ V/ cm ؟

الحل :

يمثل شكل (٥-٢٥) كـيفـية تغـير شـدة المجـال عند الوصلة مع زيادة الانحيـار العكسى. مع زيادة الانحيار العكسى تزداد رقـعة النضوب وتتعرى شحنات أكـثر فيزداد المجال تبعا لمعادلة بواسون وتتحدد قيمة النهاية العظمى $\mathcal{E}_m$ لشدة المجال من العلاقة :

$$\mathcal{E}_m = - \frac{q N_D x_n}{\varepsilon_{si}} = - \frac{q N_D x_n}{\varepsilon_{si}}$$

وحيث إن مستوى الإشابة مـتساو على ناحيتى الوصلة. يكون الاتساع x_n مساويا للاتساع x_p. وبما أن الجهد يعطى بالعلاقة :

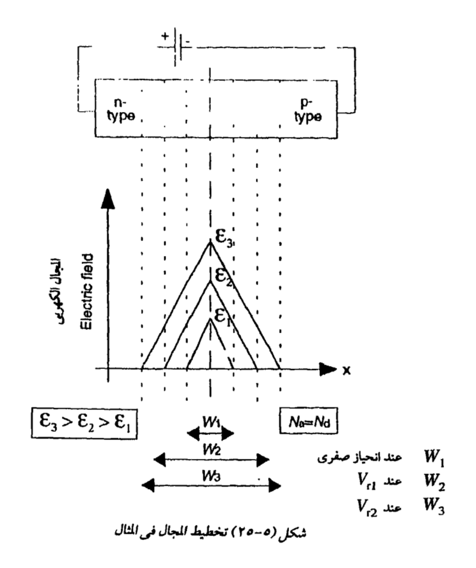
$$V = - \int \mathcal{E}_x \, d x$$

فإنه يمكن تعيينه من حساب مساحة المثلث وفقا للعلاقة :

$$V = \frac{1}{2} \left(| x_n | + | x_p | \right) \mathcal{E}_m = | x_n | \mathcal{E}_m = | x_p | \mathcal{E}_m$$

بالتعويض عن $V = 150$ V وإهمال الجهد الداخلى.

$$\therefore \quad 150 = \left(\mathcal{E}_m \frac{\varepsilon_{si}}{q N_D} \right) \mathcal{E}_m$$



شكل (٥-٢٥) تخطيط المجال فى المثال

ومنها :

$$\mathcal{E}_m = \sqrt{\frac{(150)\,(1.6\times10^{-19})\,(10^{15})}{(8.854\times10^{-14})\,(11.9)}} = 1.5\times10^{5}\ \text{V/cm}$$

وإذا كان المجال المناظر للانهيار = 10^5 v / cm

فإنه يمكن حساب جهد الإذعان من النسبة التالية :

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2}\right)^2 \qquad \therefore\ \frac{V_1}{150} = \left(\frac{10^5}{1.5\times10^5}\right)^2$$

ومنها يصبح جهد الإذعان المطلوب V_1 :

$$V_1 = 66.7 \text{ V.}$$

(٥-١٠) سعة النضوب Depletion Capacitance

نعرف عن المكثف الكهربى أنه أداة لاختزان الشحنة الكهربية وفقا للعلاقة :

$$Q = C\,V \tag{5-75}$$

حيث تمثل Q الشحنة المختزنة بالكولوم، C سعة المكثف بالفاراد، V فرق الجهد بالفولت عبر طرفى المكثف.

عند تطبيق انحيار عكسى للوصلة pn يظهر قدر كبير من الشحنات فى منطقة النضوب بالمقارنة بحالة الاتزان الحرارى، وعلى النقيض عند التأثير بانحيار أمامى عبر الوصلة، تنحصر منطقة النضوب وتقل معها الشحنات الظاهرة، بذلك تصبح هذه النبيطة شبيهة بمكثف كهربى متغير السعة تبعا للانحياز المؤثر عليها. استغلت هذه الخاصية للوصلة pn فى تصنيع نبائط خاصة تعمل كمكثفات كهربية متغيرة السعة، تعرف بالثنائى متغير السعة «فاراكتور». وتستخدم غالبا فى دوائر التوليف الكهربية.

تتغير سعة طبقة النضوب للوصلة pn لوحدة المساحات فى الثنائى بالعلاقة :

$$C_{\text{dep}} = \frac{\varepsilon_{si}}{W} \quad \text{F/cm}^2 \tag{5-76}$$

حيث W عرض طبقة النضوب، وهذه العلاقة تناظر علاقة سعة المكثف متوازى اللوحين.

نستعرض فيما يلى خواص السعة المتغيرة للوصلة pn أحادية الجانب، (المبتورة) لما لها من تطبيقات شيقة. باستخدام العلاقة (5-41) يمكن كتابة عرض طبقة النضوب لهذا الثنائى عندما يؤثر عليه بانحيار عكسى على الصورة :

$$W = \left(\frac{2\,\varepsilon_{si}\,[\,V_{bi} + V_R\,]}{q\,N_D} \right) \tag{5-77}$$

بتعويض ذلـك فى العلاقة (5-76) يمكننا حـساب السعـة لوحدة المسـاحات فى الثنائى .

$$C_{dep} = \left(\frac{q\, \varepsilon_{si}\, N_D}{2\, [\, V_{bi} + V_R \,]} \right)^{1/2} \qquad (5\text{-}78)$$

هذه العلاقة يمكن صياغتها على صورة :

$$\frac{1}{C^2} = \left(\frac{2\, [\, V_{bi} + V_R \,]}{q\, \varepsilon_{si}\, N_D} \right) \qquad (5\text{-}79)$$

خلال هذا الاسـتنتاج اخترنا الجـهة n من الوصلة لتكون جهـة مستـوى الإشابة الأقل. بالطبع يمكننا اختيار الجهة p إذا شئنا.

تخبرنا المعادلة (5-79) بأنه إذا استخـدمنا مثل هذا الثنائى فى دائرة كهربيـة نغير فيها شدة الانحياز العكسى V_R ونحسب عند كل تغيير السعة الكهربية المناظرة للوصلة C، ثم نرسم العلاقة البيانية بين V_R ، $1/C^2$ نحصل على خط مستقيم يميل بزاوية موجبة على المحور السينى. شكل (٥-٢٦)، ويمدنا مـيل الخط بمستوى الإشابة N_D، كما يمدنا طول الجزء المقطوع من محور V_R بقيمة حاجز الجهد V_{bi}. وهذه عناصر مهمة للغاية فى مجال أشباه الموصلات.

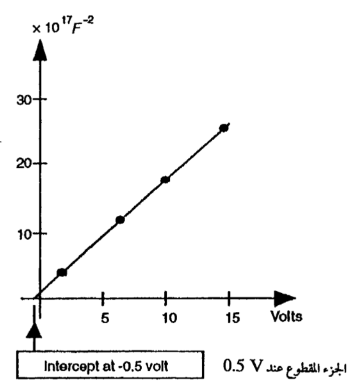
مثال ٥-٥ :

أوجد الجهد الداخلى وتركيز الإشابة فى جانب الإشابة المنخفض للوصلة $p^{++}n$، وذلك بدراسـة العـلاقة بين الانـحيـار العكسى والسـعـة فى ثنائى مـسـاحة مـقطعـه $4\times10^{-5} m^2$.

الحل :

يمثل شكل (٥-٢٦) الخط البـيانى الناتج من قـياسـات هـذه التـجـربة ومنه عند $1/C^2=0$ تكون $V_{bi} = -V_R$، وبذلك تصبح $V_{bi} = 0.5$ V. فى المعادلة (5-78) تعبر C_{dep} عن السعة لوحدة المساحـات. إذا كانت سعة الوصلة C_T فإن $C_{dep} = C_T/A$، حيث A مساحة مقطع الوصلة.

$$\therefore \quad \frac{1}{C_T^2} = \frac{2\,(\, V_{bi} + V_R \,)}{q\, \varepsilon_{si}\, N_d A^2} = \frac{2\, V_{bi}}{q\, \varepsilon_{si}\, N_d A^2} + \frac{2}{q\, \varepsilon_{si}\, N_d A^2}\, V_R$$



الجزء المقطوع عند 0.5 V

شكل (٥–٢٦) العلاقة بين V_R ، $1/C^2$ في ثنائي الوصلة p^+n

من حساب الميل $\frac{2}{q\,\varepsilon_{si}\,N_D A^2}$ والتعويض عن الثوابت، نصل إلى :

$$N_d = 4.35 \times 10^{20}\ \text{m}^{-3} = 4.35 \times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$$

مثال ٥–٦ :

احسب سعة طبقة النضوب لوصلة p^+n من السيليكون بمساحة مقطع $1.14\times10^{-3}\text{cm}^2$ إذا أثر عليها انحيار عكسي قدره 10 V ، إذا كانت درجة الإشابة $10^{16}/\text{cm}^3$ على الجانب n ، $10^{20}/\text{cm}^3$ على الجانب p^+ علما بأن كثافة تركيز الشحنة الذاتية n_i هي : $1.4\times10^{10}/\text{cm}^3$.

الحل :

فى العلاقة .

$$C_{dep} = \frac{q\,\varepsilon_{si}\,N_D}{2\,[V_{bi} + V_R]}$$

يمكن حساب :

$$V_{bi} = \frac{kT}{q}\ ln\ \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

$$= (0.0259)\ ln\ \frac{10^{16} \times 10^{20}}{(1.4 \times 10^{10})^2} = 1.1\ \text{V}$$

$$\therefore\ C_{dep} = \left[\frac{1.6 \times 10^{-19} \times 11.9 \times 8.854 \times 10^{-14} \times 10^{16}}{2\,(1.1 + 10)}\right]^{1/2} = 8.7 \times 10^{-9}\ \text{F/cm}^2$$

وتكون سعة الوصلة C_i:

$$C_i = C_{dep} \times A = 8.7 \times 10^{-9} \times 1.14 \times 10^{-3} = 10\ \text{pF}$$

(٥-١١) ملخص الفصل :

الكهربية الساكنة للوصلة *pn* والتى غطيناها فى هذا الفصل توفر أساسا لنمذجة عمل ثنائى بوصلة *pn* والنبيطات الأخرى التى تمد وصلات *pn*.

فى البداية قمنا بتعريف مصطلحات مثل الشكل الجانبى والوصلة الميتالورجية والتى شهدت النطاقات عبر الوصلة الثنائية . بعد ذلك حللنا التيار الكلى المكون من مركبتى الانسياق والانتشار مما مكننا من حساب ارتفاع حاجز الجهد فى حالة عدم وجود تيار ثم قدمنا مع أشكال توضيحية تقريب النضوب والذى يعتبر أهم وأكثر النماذج المقربة شيوعا.

باستخدام هذا النموذج تم الحصول على حلول تفصيلية لكثافة الشحنة، للمجال الكهربى، والجهد الكهروستاتيكى داخل الوصلة تحت ظروف الاتزان. وامتد التحليل ليشمل حالات الانحياز المختلفة، وتم فيها فحص تأثير جهد الانحياز الخارجى على المتغيرات المختلفة وأدى ذلك إلى رسم منحنيات نطاق فى حالتى الانحياز الأمامى والعكسى.

وقد وجد أن تيار الانحياز العكسى فى الثنائى المثالى يرتبط بالحاملات الأقلية التى تتجول فى منطقة النضوب عندما تتسارع من الناحية الأخرى من الوصلة، أما الانحياز الأمامى فيقلل حاجز الجهد بين جانبى الوصلة ويقوى حقن حاملات الأغلبية عبر الوصلة ولا يوجد بالطبع تراكم للشحنات داخل النبيطة فى حالة الاستقرار. كما تم بيان تأثير عمليات التوليد وإعادة الالتئام على استقرار تركيزات حاملات الأقلية.

وأعير الاهتمام بوجه خاص إلى صياغة واشتقاق وفحص نظرية الثنائى المثالى، وبالرغم من أنها لا تمثل الواقع بدقة إلا أنها تنير العمليات الداخلية فى الثنائى.

كما تم فحص بعض الظواهر الواقعية مثل الانهيار العكسى والانهمار وسعة النضوب.

أسئلة الفصل :

١- ثنائى pn من Ga As مبتور ، فيه $N_A = 10^{17}\ cm^{-3}$ ، $N_D = 10^{15}\ cm^{-3}$.

(أ) احسب موضع طاقة فرمى عند 300 K فى كل من المنطقة p والمنطقة n.

(ب) ارسم مخطط نطاق الطاقة عند الاتزان وعين قيمة الجهد المبيت.

٢- فى المسألة السابقة، إذا كان قطر الثنائى $50\ \mu m$. احسب اتساع طبقة النضوب فى المنطقة n والمنطقة p، وكذلك احسب مقدار الشحنة فى طبقة النضوب. ثم ارسم بروفيل (مخطط جانبى) المجال الكهربى فى الثنائى.

٣- إذا تغير جهد الانحيار على الثنائى فى المسألة (١) على النحو :

$V_F = 0.1, 0.5, 1, 5\ V$ احسب اتساع طبقة النضوب وأقصى قيمة لشدة المجال عند هذه الانحيازات.

٤- ثنائى pn مبتور من السيليكون فيه $N_A = 10^{18}\ cm^{-3}$ ، $N_D = 10^{15}\ cm^{-3}$ عند 300 K. احسب الجهد المبيت واتساع النضوب وأقصى قيمة لشدة المجال عند هذه الانحيازات.

٥- ثنائى pn من الجيرمانيوم فيه $N_A = 5\times 10^{17}\ cm^{-3}$ ، $N_D = 10^{17}\ cm^{-3}$. احسب قيمة الجهد المبيت عند 300 K. واحسب درجة الحرارة التى عندها يقل الجهد المبيت بمقدار 1%.

٦- ثنائى p^+n سيليكون فيه $N_A = 10^{18}\ cm^{-3}$ ، $N_D = 10^{18}\ cm^{-3}$ ، معامل انتشار الشغرات ناحية n يساوى $10^2\ cm^2/s$ ، $\tau_p = 10^{-7}\ s$ ومساحة النبيطة $10^{-4}\ cm^2$.
احسب تيار التشبع العكسى والتيار الأمامى عند انحياز أمامى قدره 0.4 V وعند 300 K.

٧- عرف المصطلحات التالية :

الوصلة الميتالورجية (الفلزية) - الوصلة pn - طبقة النضوب - الانهيار الإلكترونى - الانهمار.



الفصل السادس

الترانزيستور ثنائى القطب
BIPOLAR TRANSISTOR





مقدمة:

يعتبر الترانزيستور ثنائى القطب (نبيطة ذات ثلاثة أطراف تخرج من ثلاث طبقات متتابعة لأشباه موصلات n, p. قد يكون التتابع على النحو $(n\,p\,n)$ أو $(p\,n\,p)$. يبين شكل (٦ ـ ١، أ، ب) هاتين النبيطتين مع الرمز المميز لكل منهما. وفى مجال التعامل الدائم مع هذه النبيطات يعتبر الترانزيستور $(n\,p\,n)$ الأكثر شيوعا؛ ولذا سوف نتناوله بشىء من التفصيل.

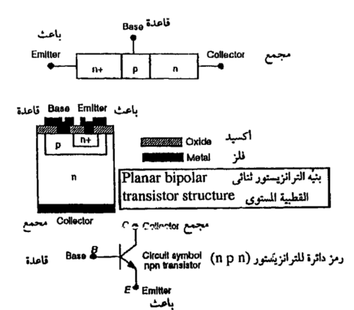
(٦ ـ ١) توصيل النبيطة Device Connection

نتيجة للأطراف الثلاثة للترانزيستور، الباعث E والقاعدة B والمجمع C، نجد أن هناك ثلاث طرق يمكن التعامل بها مع النبيطة، ويبين شكل (٦ ـ ٢) هذه الطرق المختلفة وفى أى منها يكون أحد الأطراف مشتركا بين مدخل ومخرج النبيطة وبذلك يُميز اسم منظومة الاتصال عند التشغيل المعتاد أو النشط للترانزيستور، فنجد نسق الباعث المشترك ونسق المجمع المشترك وكذلك نسق القاعدة المشتركة. ويبين شكل (٦ ـ ٣) رسما تخطيطيا لترانزيستور $(n\,p\,n)$ وفيه تكون الوصلة بين جزءى الباعث والقاعدة فى اتجاه تيار كهربى أمامى يعرف باتجاه الانحياز الأمامى، بينما تكون الوصلة بين جزءى المجمع والقاعدة فى اتجاه تيار عكسى يعرف باتجاه الانحياز العكسى.

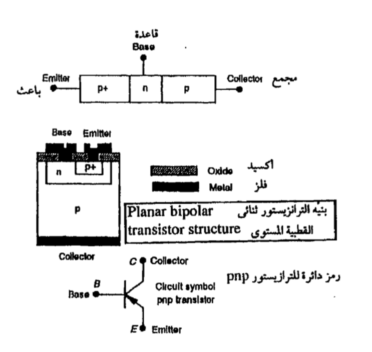
(٦ ـ ٢) مفاهيم أولية

يلعب سمك منطقة القاعدة فى الترانزيستور ثنائى القطب دورا هاما فى النبيطة. فإذا كان هذا السمك رفيعا بقدر كاف، فإن الإلكترونات المحقونة داخل القاعدة p بواسطة الانحياز الأمامى لوصلة الباعث ـ قاعدة تتاح لها فرصة الانتشار عبر القاعدة كى تصل إلى وصلة المجمع ـ قاعدة ويتبع ذلك ظهور منطقة تعادل داخل القاعدة كلما ابتعدنا عن منطقة الوصلتين نحو المركز، وإذا كان تركيز حقن الشوائب منتظما، فإن هذه المنطقة سوف تخلو من أى مجال كهربى وتصبح حركة نواقل الشحنة مدفوعة بقوة الانتشار.

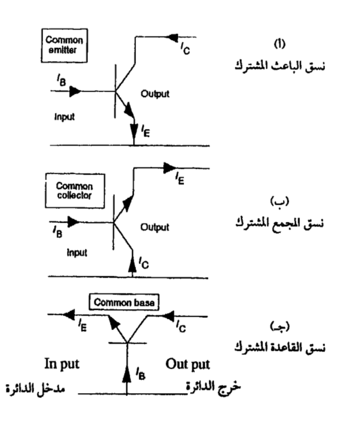
كلما ترققت طبقة القاعدة كأن تصل إلى (1 / 10) من طول الانتشار المميز للإلكترون فإن معظم الإلكترونات سوف تجبر على أن تعبر هذه الطبقة قبل أن تلتئم مع



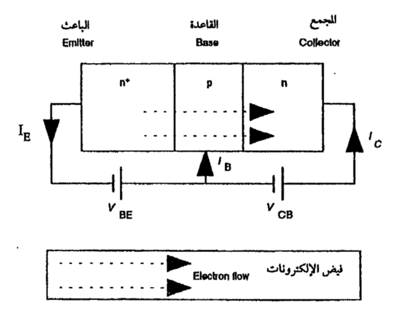
شكل (٦ ـ ١ أ) رسم تخطيطي لترانزيستور (n p n)



شكل (٦ ـ ١ ب) رسم تخطيطي لترانزيستور (p n p)



شكل (٦ ـ ٢) طرق التوصيل المختلفة للتشغيل النشط فى الترانزيستور (n p n)



شكل (٦ ـ ٣) حركات الشحنات فى ترانزيستور (n p n) عند التشغيل النشط

شحنات الأغلبية الموجبة (الشغرات) فى القاعدة ذاتها وهذه الإلكترونات التى تعبر القاعدة وتصل إلى منطقة نضوب وصلة المجمع ـ قاعدة ذات الانحياز العكسى، تجد نفسها تحت مجال كهربى يقوم بتعجيلها نحو المجمع. تمثل الإلكترونات التى تظهر قرب حافة منطقة النضوب فى القاعدة «الحاملات الأقلية» وينتج عنها تيار التسرب العكسى فى الوصلة $(p\ n)$. عندئذ إذا تعمدنا إقحام كميات من شحنة الحاملات الأقلية بجوار منطقة نضوب وصلة الانحياز العكسى، فسوف نلحظ زيادة هائلة فى قيمة التيار العكسى.

من ناحية أخرى تكون وصلة الباعث ـ قاعدة ذات انحياز أمامى ويتم عبرها حقن إلكترونات من الباعث نحو القاعدة كى تتجمع فى المجمع، وفى المقابل تحقن الشغرات من القاعدة نحو الباعث مكونة بذلك تيارا أماميا من الشغرات خلال وصلة الباعث ـ قاعدة ويعرف بتيار القاعدة.

ونعلم أنه فى ثنائى شبه الموصل تقوم الجهة المشابة بدرجة أعلى فى الوصلة بحقن غالبية حاملات الشحنة. فلو كان لدينا ثنائى $p^+ n$ فإن معظم تيار الثنائى عند الانحياز الأمامى سيكون من الشغرات، وكذلك إذا كان لدينا الثنائى $n^+ p$ سيكون معظم التيار من الإلكترونات.

لنفترض أن الترانزيستور $(n\,p\,n)$ له وصلة باعث ـ قاعدة $n^+ p$ ، فيكون معظم التيار المنساب خلال هذه الوصلة تحت تأثير الانحياز الأمامى من الإلكترونات (تيار إلكترونى). ينساب أيضا قدر ضئيل جدا من تيار الشغرات، لو تم منعه بقطع الاتصال بالقاعدة فى شكل (٦ ـ ٣) لمنع أيضا تيار الثنائى المؤلف من الباعث والقاعدة (وصلة الباعث ـ قاعدة) وينهار الانحياز الأمامى، وتبعا لذلك يتوقف انسياب التيار الإلكترونى.

فإذا أعيد الاتصال بالقاعدة عاد كل شىء إلى ما كان عليه وانهمر سيل جارف من التيار الإلكترونى بين الباعث والمجمع. وبذلك يمكن التحكم فى هذا التيار من خلال تيار القاعدة الضئيل. فإذا أمكن «هزهزة» تيار القاعدة أمكن «هزهزة» الفيضان المنساب من تيار إلكترونى بين الباعث والمجمع. بذلك قد نحصل على مكبر أو متذبذب أو مفتاح قطع ـ وصل (Switch) باستخدام هذه النبيطة.

مثال (٦ ـ ١):

ترانزيستور $(n\,p\,n)$، فيه مساحة كل من وصلتى الباعث ـ قاعدة والمجمع ـ قاعدة $0.1\ mm^2$، وفائض من كثافة إلكترونية قدرها $8.5 \times 10^{15}\ cm^{-3}$ عند وصلة الباعث ـ قاعدة. إذا كان اتساع القاعدة $5 \times 10^{-6}\ m$ وقيمة حركية الإلكترون $1500\ cm^2 / Vs$، ارسم التوزيع التقريبى للإلكترونات داخل القاعدة واستنبط قيمة تيار المجمع.

الحل:

يبين شكل (٦ ـ ٤) فى الجزء العلوى ترانزيستور $(n\,p\,n)$ بأجزائه الثلاثة المعروفة، الباعث والقاعدة والمجمع. وفيه فائض من كثافة الشحنة الإلكترونية عند وصلة الباعث ـ قاعدة ويوضحها المحور الرأسى فى الشكل البيانى، بينما يمثل اتساع (طول) القاعدة على المحور الأفقى.

بفرض أن المجمع يستوعب كل الإلكترونات التى تصله دون أن يتبقى شىء داخل القاعدة فإن كثافة الشحنة الإلكترونية تنعدم عند نهاية طول القاعدة (وصلة المجمع ـ قاعدة) وذلك خلال مسار خطى (متقطع) أو مسار منحنى (متصل). ويعنى منحنى التناقص الأسى أن اتساع القاعدة يزيد كثيرا عن طول الانتشار للإلكترون. أما المسار الخطى فيعنى أن اتساع القاعدة يقل عن طول الانتشار. وعادة يكون اتساع القاعدة ضيقا (لإحداث التسارع) وعليه نقبل بمسار التناقص الخطى لكثافة الشحنة الإلكترونية مع المسافة لحساب شدة التيار الإلكترونى، يكون التيار الناشئ تيار انتشار لانعدام المجال الكهربى فى القاعدة المتعادلة ذات الشائبة المنتظمة التوزيع. ومن خلال معادلات الانتشار، وعلاقة نيوتن فإن معامل الانتشار:

$$D_n = \mu_n \frac{k\,T}{q}$$

$$= (0.15)\,(26)\,(10^{-3}) = (3.9)\,(10^{-3}) \quad m^2\,s^{-1}$$

وتحسب كثافة تيار الانتشار J من:

$$J = q\,D_n \frac{d\,\delta n}{dx}$$

وبالاستعانة بالرسم البيانى نجد أن ميل الخط:

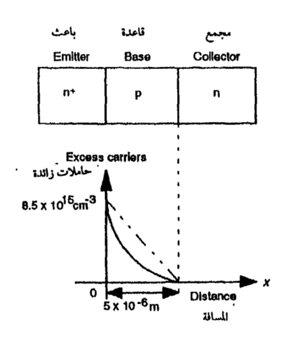
$$\frac{d\,\delta n}{dx} = \frac{8.5 \times 10^{21}}{5 \times 10^{-6}} = 1.7 \times 10^{27} \quad m^{-4}$$

ومنها:

$$J_n = (1.6 \times 10^{-14})\ (3.9 \times 10^{-3})\ (1.7 \times 10^{27}) = 1.06 \times 10^{6}\ \ Am^{-2}$$

∴ مساحة النبيطة = $0.1\ mm^2$، يصبح التيار الإلكترونى عندئذ:

$$I_n = (0.1 \times 10^{-6})\ (1.02 \times 10^{6}) = 0.102 \quad A$$



شكل (٦ ـ ٤) توزيع كثافة الشحنات الإلكترونية
داخل القاعدة، مثال (٦ ـ ١)

مثال (٦ ــ ٢):

يمكن تعريف معامل الكسب β فى ترانزيستور ثنائى القطب فى دائرة باعث مشترك بالعلاقة:

$$\beta = \frac{I_c}{I_\beta} = \frac{\text{تيار المجمع}}{\text{تيار القاعدة}} \qquad 6-1$$

إذا لم يكن هناك التئام فى القاعدة، ينتج أن تيار المجمع يساوى تيار الباعث. من ناحية أخرى يتناسب تيار الباعث مع درجة إشابة الباعث كما أن تيار القاعدة يتناسب مع درجة إشابة القاعدة. لذلك يمكن أن تئول العلاقة السابقة بصورة تقريبية إلى:

$$\beta = \frac{\text{تيار المجمع}}{\text{تيار القاعدة}} = \frac{\text{إشابة الباعث}}{\text{إشابة القاعدة}} \qquad 6-2$$

للتعرف على قيمة المقدار β فى ترانزيستور $(n\,p\,n)$ احسب معامل الكسب من المعطيات التالية:

إشابة الباعث	$N_D = 10^{20}$	cm^{-3}
إشابة القاعدة	$N_A = 5 \times 10^{16}$	cm^{-3}
اتساع القاعدة	$W_B = 0.8$	μm
معامل انتشار الإلكترون	$D_n = 3.75 \times 10^{-3}$	$m^2\ s^{-1}$
معامل انتشار الشاغرة	$D_p = 1.15 \times 10^{-3}$	$m^2\ s^{-1}$

طول الانتشار للشغرة (عند إشابة قدرها $10^{20}\,cm^{-3}$ من السيليكون) = $0.35\,\mu m$
مع فرض أن اتساع الباعث يزيد كثيرا عن طول الانتشار للحاملات الأقلية يمكن حساب كثافة تيار الانتشار لكل من الإلكترونات أو الشغرات من علاقة سابقة (69 ـ 5)

$$J_n = \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \left[exp\left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]$$

مع الأخذ فى الاعتبار أنه بالنسبة للإلكتـرون يستبدل طول الانتشار للإلكترون L_n باتساع القاعدة W_B فى الترانزيستور.

∴ تيار الإلكترونات (تيار المجمع):

$$J_n = \frac{qD_n n_{po}}{W_B} \left[exp\left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \qquad 6-3$$

وكثافة تيار الشغرات (تيار القاعدة) بتطبيق معادلة سابقة (70 – 5) هى:

$$J_p = \frac{qD_p p_{no}}{L_p} \left[exp\left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]$$

بقسمة هاتين المعادلتين نحصل على:

$$\boxed{\beta = \frac{D_n n_{po} L_p}{D_p p_{no} W_B}} \qquad 6-4$$

ولكن. نعلم أنه من المعادلات (50 , 49 -5) تكون:

على الجهة n من شبه الموصل (باعث الترانزيستور) $n_i^2 = n_{no}\ p_{no}$.

وعلى الجهة p من شبه الموصل (قاعدة الترانزيستور) $n_i^2 = p_{po}\ n_{po}$.

$$\therefore \quad \frac{n_{po}}{p_{po}} = \frac{n_{no}}{p_{po}} = \frac{N_D}{N_A}$$

حيث تمثل n_{no} إشابة الباعث N_D، ويمثل p_{po} إشابة القاعدة N_A.

$$\therefore \beta = \frac{D_n N_D L_p}{D_p N_A W_B}$$

وبالتعويض من المعطيات نجد:

$$\beta = \frac{(37.5)\ (10^{20})\ \ (0.35 \times 10^{-4})}{(11.5)\ (5 \times 10^{16})\ \ (0.8 \times 10^{-4})} = 2853$$

يلاحظ أنه بتطبيق العلاقة التقريبية باستخدام تركيزات الإشابة يكون:

$$\beta = \frac{N_D}{N_A} = \frac{10^{20}}{5 \times 10^{16}} = 2000$$

وهو ما يعتبر تقريبا مقبولا للعلاقة.

(٦-٣) أساسيات الترانزيستور Transistor Basics

يلعب اتساع القاعدة فى الترانزيستور ثنائى القطب دورا هاما فى كفاءة الترانزيستور. فإذا زاد هذا الاتساع إلى عشرة أمثال طول الانتشار شكل (٦ ـ ٥أ)، فإن أى إلكترون يحقن من الباعث إلى داخل القاعدة يلتئم بالشغرات الغالبة فى القاعدة قبل أن يصل إلى المجمع، ويكون التيار الوحيد المار فى دائرة المجمع والقاعدة هو تيار التشبع العكسى أو تيار التسرب I_{CBO} وعدم مرور تيار فى دائرة الباعث والقاعدة حيث تصبح دائرة مفتوحة O.

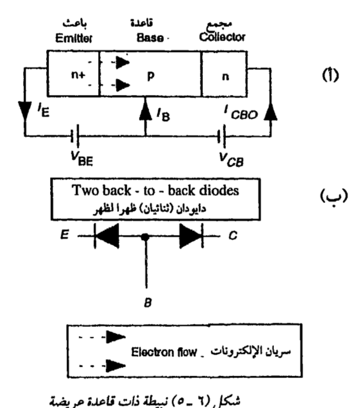
فى هذه الحالة تصبح هناك وصلتان منفصلتان بشكل تام، وتعملان كثنائيين متعاكسين، كلاهما ظهير الآخر كما يوضحه الشكل (٦ ـ ٥ب) وهكذا نرى أنه إذا زاد اتساع القاعدة فى الترانزيستور عن حد معين انعدم فعل النبيطة. ويتطلب الترانزيستور الجيد الاحتياجات التالية:

١ ـ أن يحدث فيه قدر ضئيل من الالتئام بين حاملات الشحنة لذلك يجب أن تكون القاعدة رقيقة.

٢ ـ أن يقوم الباعث بحقن قدر وافر من حاملات الشحنة إلى القاعدة؛ ولذلك يحقن الباعث بدرجة إشابة عالية.

٣ ـ ضرورة اختزال السعة الكهربية بين المجمع والقاعدة كى لا يبطئ عمل الترانزيستور عند بدء تشغيله ويتطلب ذلك حقن المجمع بدرجة إشابة خفيفة.

٤ ـ زيادة قيمة معامل الكسب β بدفع تيار صغير من حاملات الأغلبية فى القاعدة إلى الباعث، ويعنى ذلك فى الترانزيستور $(n\,p\,n)$، اختزال تيار الشغرات نحو الباعث إلى أدنى قيمة ممكنة. ويتحقق ذلك عندما تكون إشابة القاعدة أقل منها فى الباعث بعدة مرات إلا أن هناك حدودا لهذا الاختزال لأنه سيؤدى إلى زيادة مقاومة القاعدة وهذا بدوره سوف يبطئ من عمل الترانزيستور.



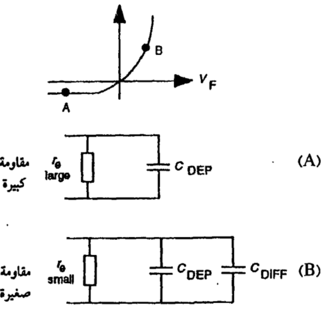
شكل (٦ ـ ٥) نبيطة ذات قاعدة عريضة

(٦ـ٤) سعة (مواسعة) الانتشار Diffusion Capacitance

إضافة للسعة الكهربية فى منطقة نضوب وصلة شبه الموصل، هناك سعة كهربية أخرى تفوقها فى المقدار وتعرف بسعة (مواسعة) الانتشار وتصاحب عملية حقن الحاملات الأقلية.

إذا تصورنا وصلة الباعث قاعدة، فى حالة الانحيار الأمامى، حيث يتم دفع أعداد غفيرة من الإلكترونات (حاملات أقلية) إلى داخل القاعدة ذات النوع p. ينشأ مخزون من هذه الحاملات بالقاعدة يكون مسئولا عن سعة الانتشار. وبذلك تصبح هذه السعة دالة فى زمن بقاء الحاملات الأقلية.

يبين شكل (٦ ـ ٦) المنحنى المميز $I-V$ لوصلة الباعث ـ قاعدة وهى تشبه المنحنيات المميزة الثنائى الموصل $p\,n$، وهناك بالشكل دائرتان كهربيتان متكافئتان للحالتين A, B على المنحنى المميز. فالنقطة A موجودة على المنحنى عند حالة الانحياز العكسى وتكون السعة الكهربية هى سعة طبقة النضوب وتتميز بمقاومة كهربية عالية. أما النقطة B فهى عند حالة الانحياز الأمامى وعندها تكون السعة مركبة من سعة طبقة النضوب وسعة الانتشار وتتميز بمقاومة كهربية داخلية صغيرة.



شكل (٦ ـ ٦) مواسعة (سعة) الانتشار

يمكن استنتاج قيمة المقاومة الداخلية للباعث باستخدام علاقة المقوّم الثنائي المثالى والتى جاءت من قبل (73 – 5) :

$$J = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_F}{kT} \right) - 1 \right]$$

حيث V_F جهد الانحياز الأمامى للوصلة المعنية. ومن قانون أوم:

$$V = IR$$

وبالتعويض عن I ثم إجراء التفاضل نحصل على:

$$\frac{1}{r_e} = \frac{dI}{dV} = \frac{q}{kT} I_0 \exp\left(\frac{qV_F}{kT} \right)$$

حيث $\frac{1}{r_e}$ هو مقلوب مقاومة الباعث.

وعند جهد انحياز كبير يؤول التيار I إلى $I_F = I_B$ ، يعطى بالعلاقة:

$$I_F = I_0 \exp \left(\frac{qV_F}{kT} \right) \qquad 6-7$$

وتصبح:

$$\boxed{\frac{1}{r_e} = \frac{qI_F}{kT}} \qquad 6-8$$

وحيث إن $kT/q \approx 26\,mV$ فإن تيارا كهربيا أماميا شدته $1\,mA$ يعطى مقاومة قدرها $r_e \approx 26\,\Omega$ للباعث.

ويلاحظ أن قيمة r_e لا تعتمد على أبعاد النبيطة وعليه فهى صالحة لأى ترانزيستور.

ولحساب قيمة سعة الانتشار، نجد أنه أثناء بقاء الحاملات الأقلية تكون العلاقة بين الشحنات المختزنة والجهد والسعة هى العلاقة المعروفة. 75 – 5

$$Q = CV$$

وفى الانحياز الأمامى لوصلة الباعث ـ قاعدة، تعتمد الشحنات المختزنة على قيمة الانحياز الأمامى $V_F (= V_{BE})$ ، وتئول العلاقة السابقة إلى:

$$C_{diff} = \frac{dQ}{dV_F} \qquad 6-9$$

تمثل Q فائض الشحنات المختزنة من الحاملات الأقلية المحقونة فى القاعدة، C_{diff} السعة الكهربية بالانتشار. وهنا لم يؤخذ فى الاعتبار القدر المتناهى فى الصغر من شغرات محقونة فى الباعث لضآلاتها ويمكن معالجتها إذا لزم الأمر بنفس هذه العلاقات.

يلتئم فائض الحاملات الأقلية بمعدل dq/dt يتحدد بزمن بقاء هذه الحاملات τ.

$$\therefore \quad \frac{dq}{dt} = \frac{Q}{\tau} = I_F \qquad 6-10$$

من المعادلات (7 – 6)، (9 – 6) ، (10 – 6) نحصل على:

$$C_{diff} = \frac{\tau q I_F}{kT} \qquad 6-11$$

تبين هذه العلاقة بجلاء مدى اعتماد السعـة الكهربية الناجمة عن انتشار الشحنات والتى تعرف بسعة الانتشار C_{diff} على كل من التيار الأمامى I_F بين الباعث والقاعدة $(= I_B)$ وزمن بقاء حاملات الأقلية τ.

مثال (٦ ــ ٣):

احسب قيمتى السعة الكهربيـة بالانتشار C_{diff} والسعة الكهربيـة لمنطقة النضوب C_{deb} فى وصلة الباعث ـ قاعدة لترانزيستور ثنائي القطب، مستخدما المعطيات التالية:

أ ـ تيار المجمع	$I_c = 0.5$ mA
ب ـ معامل الكسب	$\beta = 150$
جـ ـ اتساع طبقة النضوب	$x_{dep} = 0.1$ µm
د ـ مساحة الوصلة	$A = 225$ µm^2
هـ ـ زمن بقاء الحاملات الأقلية	$\tau = 1$ µs

الحل:

يمكن حساب السعة الكهربية لطبقة النضوب من العلاقة:

$$C_{dep} = \frac{A\varepsilon_{si}}{x_{dep}}$$

حيث ε_{si} ثابت السماحية للسيلكون:

$$C = \frac{(2.25\times10^{-10})\,(8.854\times10^{-12})\,(11.7)}{10^{-7}} = 0.233 \;\; \text{pF}$$

وبالنسبة إلى سعة الانتشار نستخدم المعادلة:

$$C_{diff} = \frac{dQ}{dV_F} = \frac{d(I_B\,\tau)}{dV_{BE}} = \frac{\tau q I_B}{kT}$$

حيث إن التيار المار نتيجة الالتئام بين فائض الإلكترونات المحقونة (من الباعث) والحاملات الأغلبية من الشغرات (فى القاعدة) هو تيار القاعدة I_B وذلك تحت تأثير انحياز أمامى عند وصلة الباعث ـ قاعدة.

لاستبدال قيمة I_B المجهولة بقيمة تيار المجمع I_c المعروفة نطبق علاقة معامل الكسب β حيث:

$$\beta = \frac{I_c}{I_B}$$

$$\therefore C_{diff} = \frac{\tau q I_c}{kT\beta}$$

$$\therefore C_{diff} = \frac{(1 \times 10^{-6})\,(0.5 \times 10^{-3})}{(26 \times 10^{-3})\,(150)} = 128 \text{ pF}$$

يوضح هذا المثال مدى كبر سعة الانتشار مقارنة بقيمة سعة النضوب وتكون النسبة بينهما:

$$\frac{C_{diff}}{C_{dep}} = \frac{128}{0.233} \approx 549.3$$

(٦ـ٥) مركبات التيار Current Components

هناك تيارات عديدة تسرى فى الترانزيستور عند تشغيله وللتعرف عليها، نفترض أن شكل (٦ ـ ٧) يمثل رسما لنطاق الطاقة فى الترانزيستور ($n\,p\,n$) وهو فى حالة اتزان حرارى، شكل (٦ ـ ٧أ) وفى حالة تشغيل نشط، شكل (٦ ـ ٧ ب) الذى يلاحظ فيه انخفاض حاجز الجهد عند وصلة الباعث ـ قاعدة عن مثيلها فى حالة الاتزان الحرارى، بسبب تأثرها بجهد الانحياز الأمامى. يؤدى ذلك إلى حقن إلكترونات فى القاعدة وحقن شغرات فى الباعث. إذا كانت القاعدة رقيقة السمك فإن الإلكترونات المحقونة فيها تنتشر عبرها حتى تصل إلى وصلة المجمع ـ قاعدة التى تكون تحت تأثير جهد انحياز عكسى أدى إلى بئر طاقة فتسقط فيه الإلكترونات (يلاحظ أنه عند دفع حاملات شحنة ما نحو بئر طاقة فإن الإلكترونات تسقط نحو قاع البئر بينما الشغرات تطفو إلى السطح).

وهناك جزء من الإلكترونات المحقونة يعاد التحامها عند القاعدة مولدة بذلك تيار القاعدة I_B، الذى يعتبر من أهم تيارات النبيطة. كما توجد أيضا تيارات صغيرة ضئيلة مثل تيار التسرب العكسى I_{Cp} من الشغرات عند وصلة المجمع ـ قاعدة. ويمثل شكل (٦ ـ ٨) هذه التيارات المختلفة التى تنساب فى الترانزيستور، وهى:

I_{En} التيار الإلكترونى الكلى المنبعث من الباعث.

I_{Cn} جزء من التيار الإلكترونى الكلى المنبعث من الباعث ويجمع بالمجمع.

$I_{En} - I_{Cn}$ الجزء المتبقى من التيار الإلكترونى الكلى المنبعث من الباعث وينساب فى القاعدة كتيار التئام.

I_{Ep} مركبة الشغرات فى تيار القاعدة وينتج عن حقن الشغرات من الباعث إلى القاعدة.

I_{Cp} مركبة الشغرات فى تيار التسرب الكلى بين المجمع والقاعدة.

وإذا كانت الأسهم داخل الترانزيستور تشير إلى اتجاه الإلكترونات والشغرات فإن اتجاه التيار الكهربى يكون عكس ذلك كما تبينه الأسهم خارج الترانزيستور.

(٦ـ٦) وسائط (بارامترات) الترانزيستور Transistor Parameters

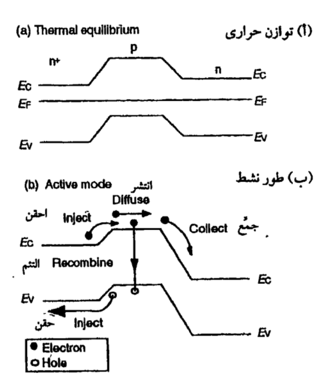
قد يعمل الترانزيستور فى طور التشغيل النشط، كما جاء فى شكل (٦ ـ ٣). وفيه تشارك القاعدة كل من دخل الدائرة بين الباعث والقاعدة وخرج من الدائرة بين المجمع والقاعدة، يعرف هذا النسق من التوصيل بنسق القاعدة المشتركة.

لإيجاد وسائط الترانزيستور فى هذا النسق، نعرف أن تيار المجمع I_C يتألف من الجزء α_0 من تيار الباعث I_E إضافة إلى تيار التسرب العكسى I_{CBO}، أى أن:

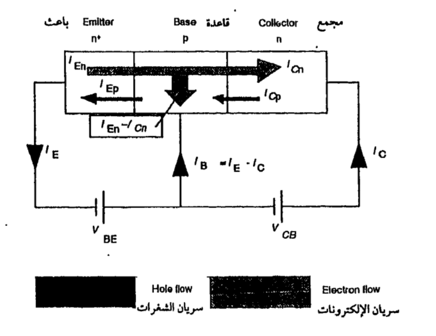
$$I_C = \alpha_0 I_E + I_{CBO} \qquad 6-12$$

تعرف α_0 بمعامل الكسب للترانزيستور فى نسق القاعدة المشتركة عند تغيرات طفيفة فى الجهد والتيار. وبتفاضل هذه المعادلة نحصل على:

$$\alpha_0 = \frac{\delta I_C}{\delta I_E}\bigg|_{V_{CB}} \qquad 6-13$$



شكل (٦ ـ ٧) تخطيطات لنطاق الطاقة فى الترانزيستور



شكل (٦ ـ ٨) مركبات التيار الكهربى فى الترانزيستور

وحيث إن:

$$I_E = I_C + I_B \qquad 6-14$$

وبقاء $I_B > 0$، تصبح $I_C < I_E$ ومنها $\alpha_0 < 1$.

يلعب تيار القاعدة دورا هاما فى عـمل الترانزيستور فى هذا النسق وهناك عوامل تسهم فى تيار القاعدة منها:

(أ) الشحنات المحقونة من القاعدة إلى الباعث.

(ب) الشحنات الملتئمة (الملتحمة) فى القاعدة.

تقودنا دراسة العامل (أ) إلى استنتاج معامل كفاءة الباعث.

بينما يمكننا العامل (ب) من حساب قيمة عامل النقل فى القاعدى.

(٦ـ٧) معامل كفاءة الباعث Emitter Efficiency

يعرف هذا المعامل بأنه النسبة بين التيار الإلكترونى I_{En} المحقون من الباعث إلى التيار الكلى I_E فيه. ويمكن حسابه من العلاقة:

$$I_E = I_{En} + I_{EP} \qquad 6-15$$

$$\therefore \gamma = \frac{I_{En}}{I_E} = \frac{I_{En}}{I_{En} + I_{EP}} \qquad 6-16$$

= معامل كفاءة الباعث

إذا كان الترانزيستور من النوع n^+pn فإن $I_{EP} < I_{En}$ وتصبح:

$$\gamma = 1 - \frac{I_{Ep}}{I_{En}} \qquad 6-17$$

وبذلك تكون $\gamma \leq 1$. وبتطبيق علاقات المقوم الثنائى عند وصلة الباعث ـ قاعدة، يمكن حساب قيمة شدة تيار الشغرات I_p المحقون من القاعدة إلى الباعث من العلاقة:

$$I_p = I_{Ep} = \left(\frac{qD_p\, p_{no} A}{L_p}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right] \qquad 6-18$$

حيث A مساحة الوصلة، L_{PE} طول الانتشار للشغرة فى الباعث.

كما يعطى تيار الحقن الإلكترونى I_n من الباعث إلى القاعدة بالعلاقة:

$$I_n = I_{En} = \left(\frac{qD_n n_{Po} A}{W_B} \right) \left[exp\left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad 6-19$$

حيث تمثل W_B الاتساع الفعال لسمك القاعـدة. من هذه العلاقات يمكن استنتاج قيمة γ فى الترانزيستور (npn) على الصورة:

$$\boxed{\gamma = 1 - \frac{D_p p_{no} W_B}{D_n n_{Po} L_{PE}}} \quad 6-20$$

وبدلالة درجات إشابه القاعدة N_A وإشابة الباعث N_D يمكن التعبـير عن معامل كفاءة الباعث γ على الصورة:

$$\boxed{\gamma = 1 - \frac{D_p N_A W_B}{D_n N_D L_{PE}}} \quad 6-21$$

تؤكد هذه النتيـجة ما سبق التنويه عنه وهو أن تحسين عـمل الباعث يتطلب إشابة عالية للباعث وإشابة خفيفة للقاعدة مع تصغير اتساعها إلى حد ما. أى الوصول بالمقدار $(N_A W_B / N_D)$ إلى أدنى قيمة ممكنة له، بذلك تقترب كفاءة الباعث γ من الوحدة.

(٦-٨) عامل نقل القاعدة Base Transport Factor

يعرّف هذا المعامل α_T بالنسبـة بين التيـار الإلكترونى I_{Cn} الواصل للمجمع إلى التيار الإلكترونى الكلى I_{En} المنبعث من الباعث:

$$\boxed{\alpha_T = \frac{I_{Cn}}{I_{En}}} \quad \text{عامل نقل القاعدة} \quad 6-22$$

وهو مؤشر لنسبة الفاقد من التيار المحقون داخل القاعدة من جراء عمليات الالتئام (إعادة الالتـحام) داخلها. وبالاستـعانة بشكل (٦ - ٩) يمكن حساب فـائض الشحنات الإلكترونية q_{base} المختزنة فى القاعدة الرقيقة السمك وذلك من العلاقة:

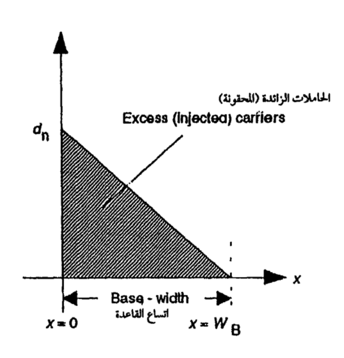
$$q_{base} = \frac{q\, \delta n\, A\, W_B}{2} \quad 6-23$$

حيث δn فائض كثافة الشحنة المحـقونة عند وصلة الباعث ـ قاعدة عند $x = 0$.
ولكن مما سبق نجد أن:

$$I_{En} = \gamma I_E \qquad 6-24$$

و

$$I_{Cn} = \alpha_T I_{En} = \alpha_T \gamma I_E \qquad 6-25$$



شكل (٦ ـ ٩) فائض شحنات القاعدة

ويكون الفرق بين هاتين العلاقتين هو تيار الالتئام $I_B (recomb)$:

$$I_B (recomb) = I_{En} - I_{Cn} = (1 - \alpha_T) \gamma I_E \qquad 6-26$$

إضـافـة إلى ذلك يمكن تعـيين كل من تيـار البـاعث I_E وتيـار القاعـدة I_B من العلاقات:

$$I_E = \frac{q_{base}}{\tau_{TR}} \qquad 6-27$$

$$I_B = \frac{q_{(base)}}{\tau_B} \qquad 6-28$$

حيث تمثل τ_{TR} زمن عبور الإلكترونات للقاعدة. τ_B زمن حياة الحاملات الأقلية فى القاعدة. بالتعـويض عن هذه القيم فى المعادلة (26 – 6) ومع الافتراض أن γ يمكن أن تئول إلى الوحدة نحصل على عامل نقل فى القاعدة:

$$\boxed{\alpha_T = 1 - \frac{\tau_{TR}}{\tau_B}} \quad \text{(عامل نقل القاعدة)} \qquad 6-29$$

وللحصول على قيمـة هذا المعامل بدلالة سمك القاعدة W_B وطول الانتشار L_{nB} للإلكترون، يمكن الاستعانة بعلاقة تيار انتشار الإلكترونات:

$$I_n = q\, D_n A \left.\frac{d\delta n}{dx}\right|_{x=0} = I_{En} \qquad 6-30$$

بالرجوع إلى شكل (٦ ـ ٩)، نجد أن ميل الخط:

$$\frac{d\delta n}{dx} = \frac{\delta n}{W_B} \qquad 6-31$$

وبفرض جودة الباعث ($\gamma = 1$) يمكن كتابة المعادلة (30 – 6) فى صورة:

$$I_E = \frac{qD_n\, \delta n\, A}{W_B} \qquad 6-32$$

باستخدام العلاقات (23 – 6)، (27 – 6)، (32 – 6) يمكن التوصل إلى:

$$\tau_{TR} = \frac{W_B^{\,2}}{2D_n} \qquad 6-33$$

وكذلك يرتبط طول الانتشار L_n بزمن حياة الحاملات τ_B من خلال العلاقة:

$$\tau_B = \frac{L^2_{nB}}{2D_n} \qquad 6-34$$

بالتعويض عن هذين الزمنين فى العلاقة نحصل على صورة أخرى للمعامل α_T وهى:

$$\boxed{\alpha_T = 1 - \frac{W^2_B}{2L^2_{nB}}} \qquad \text{(عامل نقل القاعدة)} \qquad 6-35$$

وتدلنا هذه العلاقة إلى أنه للحد من عمليات إعادة الالتحام والالتئام فى منطقة القاعدة يلزم اختزال سمك القاعدة W_B وزيادة طول الانتشار L_{nB} للحاملات الأقلية فيها، تأكيدا لما جاء من قبل.

وكذلك يرتبط كل من زمن حياة الحاملات الأقلية τ_B والزمن العابر للشحنات فى تخطيها للقاعدة τ_{TR} بتكبير التيار β فى نسق الباعث المشترك للترانزيستور بالعلاقة:

$$\boxed{\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\tau_B}{\tau_{TR}}} \qquad 6-36$$

وذلك بفرض أن إعادة التلاحم والتئام الحاملات الأقلية من إلكترونات فى منطقة القاعدة هى الآلية الغالبة فيها.

مثال هام (٦ ــ ٤):

استنبط العلاقة بين تكبير التيار α_0 فى نسق القاعدة المشتركة ومعامل التكبير β فى نسق الباعث المشترك فى الترانزيستور.

الحل:

عند التغيرات الصغيرة فى شدة التيار، كانت كل من:

$$\beta = I_C / I_B \qquad 6-1$$

$$\alpha_0 = I_C / I_E \qquad 6-13$$

$$\therefore I_E = I_C + I_B \qquad 6-14$$

وبذلك تصبح

$$\therefore \alpha_0 = \frac{I_C}{I_C + I_B} = \frac{1}{1 + (I_B / I_C)} \qquad 6-37$$

$$\boxed{\therefore \alpha_0 = \frac{\beta}{\beta + 1}} \qquad 6-38$$

و

$$\boxed{\beta = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0}} \qquad 6-39$$

مثال (٦ ــ ٥):

ترانزيستور *(npn)* ثنائى القطب من السيليكون، فيه إشابة القاعدة $10^{16}\ cm^{-3}$. إذا كان معامل انتشار الإلكترون فى القاعدة $10\ cm^2 s^{-1}$ وزمن حياة الإلكترون $10^{-6}\ s$. احسب سمك القاعدة اللازم للحصول على عامل انتقال القاعدة 0.997.

الحل:

$$\alpha_T = 1 - \frac{W_B^2}{2 L_{nB}^2} = 1 - \frac{W_B^2}{2 D_n \tau_B}$$

$$0.997 = 1 - \frac{W_B^2}{(2)(10) \times (10^{-6})}$$

ومنه:

$$W_B = 2.53\ \ \mu m$$

مثال (٦ ــ ١):

ترانزيستور *(npn)* فى نسق القاعدة المشتركة. فيه:

إشابة الباعث	N_D	=	5×10^{17} cm^{-3}
إشابه القاعدة	N_A	=	1×10^{17} cm^{-3}
سمك القاعدة	W_B	=	1×10^{-4} cm
معامل الانتشار	$D_n = D_p$	=	20 $cm^2 s^{-1}$

احسب معامل تكبير التيار α_0 فى نسق القاعدة المشتركة ومعامل تكبير التيار β فى نسق الباعث المشترك. إذا كان زمن حياة الحاملات الأقلية من الإلكترونات والشغرات هو، 10^{-6} s.

الحل:

$$\because L = \sqrt{D\tau}$$

$$\therefore L_n = L_P = \sqrt{20 \times 10^{-6}} = 44.7 \quad \mu m.$$

فى نسق القاعدة المشتركة للترانزيستور ترتبط الكميات $\alpha_T, \gamma, \alpha_0$ بالعلاقة:

$$\alpha_0 = \gamma\, \alpha_T \qquad 6-40$$

$$= \left(1 - \frac{D_P N_A W_B}{D_n N_D L_{PE}}\right) \left(1 - \frac{W_B^{\,2}}{2 L^2_{nB}}\right) \qquad 6-41$$

$$\doteq \left(1 - \frac{(20)\,(10^{17})\,(10^{-4})}{(20)\,(5 \times 10^{17})\,(44.7 \times 10^{-4})}\right) \left(1 - \frac{(10^{-4})^2}{2\,(4.47 \times 10^{-4})^2}\right)$$

$$= 0.9953$$

وبذلك تصبح:

$$\beta = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} = 211.8$$

(٩-٦) النبيطة BJT فى الترددات العالية

High Frequency Behavior of BJT

تعتبر عمليـة تكبير الإشارات الكهربية عند الترددات العاليـة واحدا من التطبيقات الهامة للتـرانزيستور ثنائى القطب الوصلى *BJT*. وتقاس الاستجابة للـتردد بقيمة تردد القطع f_T وارتباطه بزمن التأخير الكلى τ_{ec} الذى يمثل تقدم حاملات الشحنة من الباعث إلى المجمع ويعرف بالعلاقة:

$$f_T = \frac{1}{2\pi \tau_{ec}}$$

ويعبر زمن التأخير الكلى τ_{ec} عن مجموع أزمنة التأخير أخرى ومن العلاقة:

$$\tau_{ec} = \tau_e + \tau_{TR} + \tau_d + \tau_c$$

حيث:

τ_e زمن شحنة السعة الكهربية بين الباعث والقاعدة.

τ_{TR} زمن عبور القاعدة.

τ_d زمن عبور طبقة النضوب ناحية المجمع.

τ_c زمن شحن السعة الكهربية المصاحبة للمجمع.

كما تعطى هذه الأزمنة المختلفة بالعلاقات التالية:

$$\tau_e \doteq r_e C_{je}$$

$$\tau_{TR} = \frac{W^2{}_B}{2D_b}$$

$$\tau_d = \frac{W_{dc}}{v_S}$$

$$\tau_c = r_c (C_\mu + C_S)$$

حيث تمثل كل من:

r_e	مقاومة الباعث وتحسب من ميل العلاقة بين I_E ،V_{BE}.
C_{je}	السعة الكهربية للوصلة.
W_{dc}	سمك طبقة النضوب فى وصلة المجمع ـ قاعدة.
v_S	سرعة التشبع.
W_B	سمك القاعدة.
D_b	معامل الانتشار فى قاعدة الترانزيستور ثنائي القطب.
r_c	المقاومة الكهربية المصاحبة للمجمع.
C_μ	السعة الكهربية لوصلة المجمع ـ قاعدة، (فى انحيار عكسى).
C_S	السعة الكهربية بين المجمع المشاب والركيزة.

وللوصول إلى قيمة عالية لتردد القطع يحتاج الأمر إلى:

١ ـ باعث يتألف من شرائح ضيقة (أى سطح صغير للنبيطة).

٢ ـ تيار باعث كبيرة لاختزال المقاومة الكهربية r_e.

٣ ـ منطقة قاعدة رقيقة للغاية (لاختزال τ_{TR}).

٤ ـ سعات كهربية طفيلية منخفضة.

هذا مع ضرورة استخدام خامات ذات استجابة فائقة لظواهر الانتقال.

ويلاحظ أنه مع زيادة Ic تزداد قيمة f_T أول الأمر نتيجة لتناقص τ_e، زمن شحن السعة الكهربية المصاحبة لوصلة الباعث ـ قاعدة، ثم تعود τ_T للتناقص نتيجة لظاهرة «كيرك» وهى ظاهرة تسبب تمدد منطقة القاعدة إلى داخل المجمع، فتؤدى إلى زيادة زمن عبور القاعدة، τ_{TR}.

مثال (٦ ــ ٧):

ترانزيستور (npn) وصلى عند $300K$ فيه:

تيار الباعث	I_E	$= 1.5 \ mA$
السعة الكهربية لوصلة الباعث ـ قاعدة	C_{je}	$= 2 \ pF$
سمك القاعدة	W_B	$= 0.4 \ \mu m$
معامل الانتشار فى القاعدة	D_b	$= 60 \ cm^2 s^{-1}$
سمك طبقة النضوب عند المجمع	W_{dc}	$= 2 \ \mu m$
مقاومة المجمع	r_c	$= 300 \ \Omega$
السعة الكهربية الكلية للمجمع	$(c_\mu + c_S)$	$= 0.4 \ pF$

احسب تردد القطع لهذا الترانزيستور.

الحل:

تعطى مقاومة الباعث r_e من العلاقة:

$$r_e = \frac{dI_E}{dV_{BE}} \cong \frac{kT}{qI_E} = \frac{0.026}{1.5 \times 10^{-3}} = 17.3 \ \Omega$$

وهذه تعطى τ_e، زمن شحن السعة الكهربية المصاحبة لوصلة الباعث ـ قاعدة من:

$$\tau_e = r_e C_{je} = (17.3)(2 \times 10^{-12}) = 34.6 \quad ps$$

وتحسب زمن عبور القاعدة τ_{TR} من:

$$\tau_{TR} = \frac{W^2_B}{2D_b} = \frac{(0.4 \times 10^{-4})^2}{2 \times 60} = 13.3 \quad ps$$

ويكون زمن عبور المجمع τ_d من:

$$\tau_d = \frac{W_{dc}}{V_S} = \frac{(2 \times 10^{-4})}{1 \times 10^7} = 20 \quad ps$$

زمن شحن السعة الكلية المصاحبة للمجمع:

$$\tau_c = r_c \ (C_\mu + C_S) = 30 \, (0.4 \times 10^{-12}) = 12 \ ps$$

∴ الزمن التأخير الكلى:

$$\tau_{ec} = 34.3 + 13.3 + 20 + 12 = 79.9 \text{ ps}$$

ومن ثم تصبح قيمة تردد القطع هى:

$$f_T = \frac{1}{2\pi\, \tau_{ec}} = \frac{1}{2\pi\, (79.9 \times 10^{-12}\, \text{s})} = 1.99 \text{ GHz}$$

وإذا تم مضاعفة تيار الباعث (بفرض عدم تغير أى شىء آخر) فإن τ_e تنخفض إلى النصف وتصبح $f_T = 2.54$ GHz.

وعند اختزال سمك القاعدة إلى النصف يصبح زمن عبور القاعدة $\tau_{TR} = 3.3$ ps ، وتصبح $f_T = 2.08$ GHz.

فى هذا المثال يتركز معظم التأخير عند وصلة الباعث ـ قاعدة.

(٦ـ١٠) الاختراق الكلى Punch – Through

يبين شكل (٦ ـ ١٠) ترانزيستور (*npn*) يعمل فى طور التشغيل النشط تحت تأثير جهد انحياز عكسى ($V_{CB} = V_1$) حول وصلة المجمع ـ قاعدة، فيتكون عندها طبقة نضوب سمكها W_2. وتمثل W_1 سمك طبقة نضوب وصلة الباعث ـ قاعدة الموجودة تحت تأثير جهد انحيار أمامى V_{BE}.

مع زيادة جهد الانحيار العكسى V_{CB} عند وصلة المجمع ـ قاعدة من القيمة V_1 فى الشكل (أ) إلى القيمة V_2 فى الشكل (ب) تزداد طبقة النضوب عندها بصورة تتناسب مع الدالة V_{CB}، ويصحب ذلك اختزال سمك القاعدة المحايدة. يعرف هذا السمك بسمك القاعدة الفعال W_B ويحدث فيه انتشار الإلكترونات.

من جهــة أخرى تزداد قــيمــة التيار الإلكــترونى I_{En} للباعث مع اخــتزال سمك القاعدة وفقا للعلاقة التى وردت من قبل $V\ (6-19)$:

$$I_n = I_{En} = \left(\frac{qD_n n_{Po} A}{W_B} \right) \left[exp\left(\frac{qV}{k_B T} \right) - 1 \right] \qquad (6-19)$$

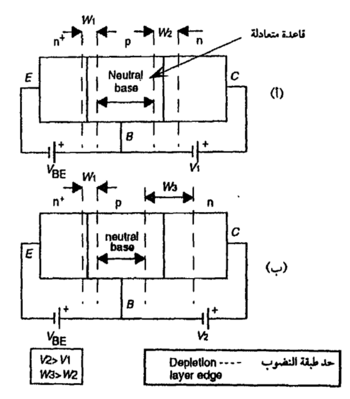
ويفسر شكل (٦ ـ ١١) سلوك المنحنيات المميــزة للترانزيستور فى هذا النسق وهذا الانحيــار. مع الاستمــرار فى زيادة الانحيار العكسى يتــزايد اتساع طبقــة النضوب عند وصلة المجمع إلى أن تلتــقى مع حافة طبــقة نضوب وصلة ـ البــاعث ـ قاعدة فيــحدث اختــراق كلى يزداد معــه شدة تيــار الباعث بصــورة مطردة مع زيادة V_{CB} ويبطل عمل الترانزيستور. وإذا كان سمك قاعدة الترانزيستــور كبيرا نسبيا فإنه يحدث أن تنهار وصلة المجمع ـ قاعدة قبل حدوث الاختراق الكلى.

يمكن حساب قيمة جهد الاختراق الكلى من العلاقة:

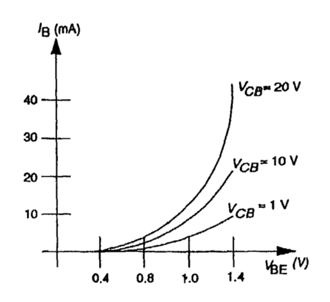
$$V_{Pi} = \frac{qW_B^2 N_A (N_A + N_D)}{2\,\varepsilon\, N_D} \qquad 6-42$$

حيث تمثل $(\varepsilon = K\,\varepsilon_0)$ قيمة ثابت العازل لمادة شبه الموصل، N_D إشابة المجمع، كما يمكن حساب سمك طبقة النضوب فى القاعدة عند الاختراق الكلى من العلاقة:

$$W_B = \left\{ \frac{2\,\varepsilon\,(V_{bi} + V_{Pi}) N_D}{q\,N_A (N_D + N_A)} \right\}^{1/2} \qquad 6-43$$



شكل (٦ ـ ١٠) الاتساع المحايد (المعتاد) للقاعدة



شكل (٦ ـ ١١) منحنيات $(I-V)$ المميزة لترانزيستور (npn) فى نسق القاعدة المشتركة .

مثال (٦ ـ ٨):

ترانزيستور (npn) من السيليكون فيه إشابة القاعدة $5 \times 10^{16}\ cm^{3}$ وإشابة المجمع $10^{16}\ cm^{-3}$. احسب جهد الاختراق الكلى لهذا الترانزيستور إذا كان سمك القاعدة عند $0.2\ \mu m$.

الحل:

بتطبيق العلاقة:

$$V_{P_t} = \frac{qW^2 N_A (N_A + N_D)}{2 \varepsilon N_D}$$

والتعويضات عن الكميات:

$$q = 1.6 \times 10^{-19}\ C \quad W_b = 0.2 \times 10^{-4}\ cm,$$
$$N_A = 5 \times 10^{16}\ cm^{-3},\ N_D = 1 \times 10^{16}\ cm^{-3}$$

ثابت العازل للسيليكون :

$$\varepsilon_{si} = (11.9)(8.85 \times 10^{-14})\ F/cm$$

نحصل على:

$$V_{P_t} = 9.27\ V.$$

عند الاختراق، يعطى سمك طبقة نضوب وصلة المجمع ـ قاعدة، W_c بالعلاقة:

$$W_C = \frac{N_A}{N_D} . W_B \qquad \therefore W_C = 1\ \mu m$$

ويصبح الاتساع الكلى لطبقة النضوب عند الاختراق $W_C + W_B = 1.2\ \mu m$

فيكون متوسط شدة المجال عند الاختراق E.

$$E = \frac{V_{P_t}}{W_C + W_C} = \frac{9.27}{1.2 \times 10^{-4}} = 7.7 \times 10^{4}\ V/cm$$

هذه القيمة من شدة المجال الكهربى تقل كثيرا عما يحتاجه انهيار وصلة المجمع وتقدر بالقيمة التقريبية 4×10^5 V / cm فى السيليكون. من ذلك نستنتج أنه فى هذا الترانزيستور تكون لآلية الاختراق الكلى الغلبة فى انهيار وتحلل هذه النبيطة.

(٦ ـ ١١) أنماط (صيغ) التشغيل Modes of Operation

يتميز الترانزيستور ثنائي القطب بوصلتى الباعث ـ قاعد والمجمع ـ قاعدة. وتكونان تحت تأثير جهد انحياز أمامى أو عكسى. يؤدى ذلك إلى وجود أربعة احتمالات لنسق الانحياز، تعرف بصيغ أو أنماط تشغيل الترانزيستور وهى:

٦ ـ ١١ ـ ١ ـ النمط النشط Active Mode

يمثل شكل (٦ ـ ١٢) ترانزيستور (*npn*) فى طور التشغيل النشط ويتضح فيه توزيع الحاملات الأقلية فى مناطق الباعث والقاعدة والمجمع إضافة إلى جهد الانحياز الأمامى عند وصلة الباعث ـ قاعدة وجهد الانحياز العكسى عند وصلة المجمع ـ قاعدة وقد ورد الحديث عن هذا النمط فى عدة مواضع من هذا الفصل.

٦ ـ ١١ ـ ٢ ـ نمط التشبع Saturation Mode

فى هذه الحالة تكون الوصلتان عند جهد انحياز أمامى ويكون الترانزيستور فى حالة توصيل قصوى ويعمل كما لو كان مفتاحا (سويتش) مغلقا فى دائرة. فى هذا النمط تكون قيمة V_{CE} صغيرة، حيث يفترض انعدام فرق الجهد عبر الترانزيستور الذى يكون فى حالة غلق، شكل (٦ ـ ١٣).

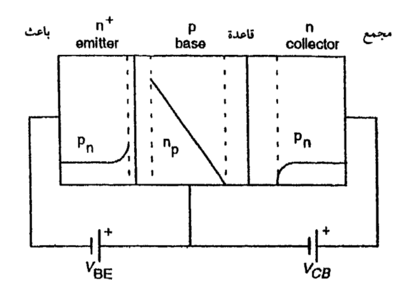
٦ ـ ١١ ـ ٣ ـ نمط القطع Cut – Off Mode

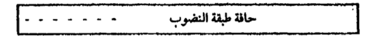
فيه تكون كلتا الوصلتين عند جهد انحياز عكسى فلا يسرى غير تيارات التسرب العكسية وهى حالة نقيض نمط التشبع حيث يمثل فيه الترانزيستور مفتاحا (سويتش) مفتوحا فى دائرة، شكل (٦ ـ ١٤).

٦ ـ ١١ ـ ٤ ـ النمط المعكوس (المقلوب) Inverted Mode

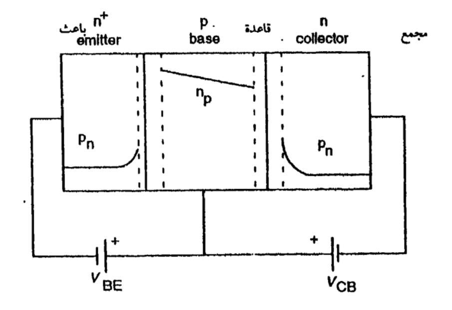
فيه تكون وصلة الباعث ـ قاعدة، عند جهد انحياز عكسى ووصلة المجمع ـ قاعدة عند جهد انحياز أمامى؛ ولذلك قد يعرف هذا النمط أيضا بأنه النمط النشط المقلوب حيث يقوم المجمع بدور الباعث ويقوم الباعث بدور المجمع. والتيار المار فى هذه الحالة يكون صغيرا لعدم توافر شروط الإشابة الضرورية. ففيه أصبحت إشابة «الباعث» صغيرة وإشابة «المجمع» عالية، شكل (٦ ـ ١٥).

وعلى الرغم من غرابة هذا النمط من التشغيل، إلا أنه يستخدم فى تطبيقات حقن دوائر المنطق المتكاملة.



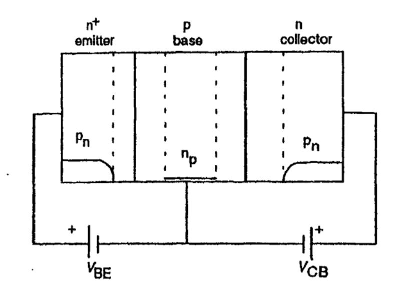


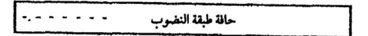
شكل (٦ ـ ١٢) ترانزيستور (*npn*) فى النمط النشط



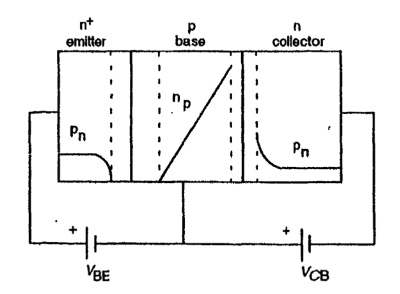
حافة طبقة النضوب

شكل (٦ ـ ١٣) ترانزيستور (*npn*) فى نمط التشبع





شكل (٦ ـ ١٤) ترانزيستور (npn) فى نمط القطع



حافة طبقة النضوب

شكل (٦ ـ ١٥) ترانزيستور (npn) فى النمط المعكوس

ويمثل شكل (٦ ـ ١٦) المنحنيات المميزة $(I - V)$ لترانزيسور (npn) فى نسق الباعث المشترك.

(٦ـ١٢) تحسين كسب التيار Current Gain Enhancement

تتميز الترانزيستورات ثنائية القطب فى الدوائر المتكاملة بنسبة صغيرة جدا من عملية إعادة التحام والتئام حاملات الشحنة. ولقد وجد أن عملية حقن الحاملات الأقلية من القاعدة إلى الباعث تؤدى إلى نقص حاد فى قيمة معامل الكسب. وهناك طريقتان لمنع هذا النقص فى معامل الكسب، وهما؛ طريقة الوصلات غير المتجانسة، وطريقة الباعث عديد التبلور.

٦ـ١٢ـ أ ـ الوصلات غير المتجانسة Heterojunctions

يمثل شكل (٦ ـ ١٧) نماذج شرائط الطاقة فى:

(أ) وصلة عادية (متجانسة) لترانزيستور (npn) ثنائى القطب.

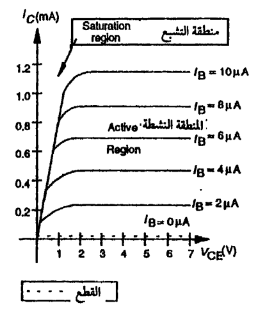
(ب) وصلة ترانزيستور (npn) ثنائى القطب فيها باعث ذو فجوة طاقة واسعة.

(جـ) وصلة لترانزيستور (npn) ثنائى القطب فيها قاعدة ذات فجوة طاقة ضيقة.

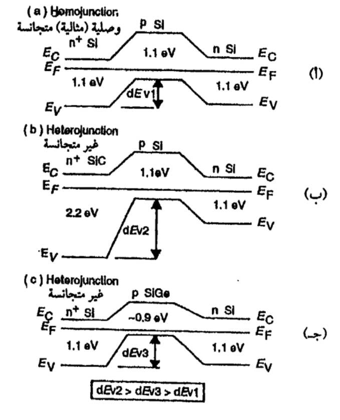
تعرف الحالتان (ب)، (جـ) بأنهما لترانزيستورات ثنائية القطب ذات وصلات غير متجانسة وذلك لاختلاف مادتى شبه الموصل على جانبى الباعث فى الحالة (ب) وعلى جانبى القاعدة فى الحالة (جـ).

وبدراسة الوصلات فى كل حالة، نجد أنه فى الحالة القياسية للترانزيستور (أ) ليس هناك ما يمنع حقن الشغرات من القاعدة إلى الباعث فى نسق الانحياز الأمامى للوصلة pn. أما فى الحالة (ب) فإن الباعث يتميز بفجوة طاقة واسعة (2.2 eV) وبذلك يمثل عائقا لعملية حقن الشواغر من القاعدة إلى الباعث لارتفاع العائق أمام حركة هذه الشغرات، وبذلك ينخفض تركيز الشواغر المحقونة انخفاضا حادا وفق دالة أسية مع الزيادة الخطية الطفيفة فى ارتفاع العائق وهذا بدوره يؤدى إلى زيادة هائلة فى تكبير التيار. ويمكن الحصول على باعث من شبه موصل يتميز بفجوة الطاقة الواسعة فى المركب «كربيد السيليكون».

يمكن الحصول على نفس النتيجة السابقة باستخدام قاعدة من شبه موصل ذات فجوة طاقة ضيقة (0.9 eV) كما فى سبيكة السيليكون والجرمانيوم. فى كلتا هاتين الحالتين يتم اختزال كثافة الشغرات المحقونة من القاعدة إلى الباعث إلا أن هناك اختلافا جوهريا بين هاتين الحالتين وهو أنه فى حالة الباعث ذى فجوة الطاقة الواسعة يتضمن الترانزيستور وصلة واحدة غير متجانسة، بينما فى حالة القاعدة ذات فجوة الطاقة الضيقة



شكل (٦ ـ ١٦) منحنيات $(I-V)$ المميزة لترانزيستور (npn) فى نسق الباعث المشترك



شكل (٦ ـ ١٧) نطاقات الطاقة فى الوصلات غير المتجانسة

يتضمن الترانزيستور وصلتين غير متجانستين واحدة عند وصلة الباعث ـ قاعدة وهى ضرورية، والأخرى عند وصلة المجمع ـ قاعدة، وهى غير ضرورية وقد تسبب مشكلات إذا لم يتوخى الحذر عند التعامل معها.

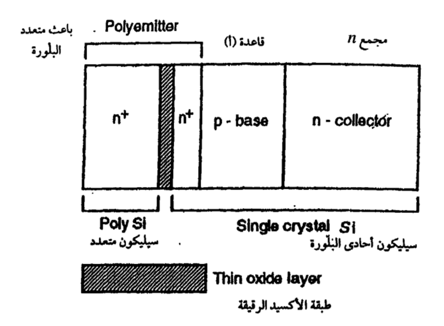
٦ـ١٢ـ٢ـ الباعث متعدد التبلور Polyemitter

هذه طريقة أخرى للحد من حقن الشواغر من القاعدة إلى الباعث وتستخدم فيها نبيطة تحتوى على طبقة رقيقة جدا من أكسيد النحاسوز SiO_2، سمكها $1\mu m$ تقريبا وتفصل بين منطقتى القاعدة والباعث، شكل (٦ ـ ١٨). للحصول على هذه النبيطة عند تصنيع الترانزيستور، يترك السيليكون عند منطقة الباعث لينمو فوق سطح أكسيد النحاسوز الأمورفى بدلا من إنمائه فوق سطح بلّورة أحادية. وبذلك يتشكل الباعث على هيئة سيليكون عديد التبلور. ويتميز أكسيد النحاسوز بفجوة طاقة كبيرة فى نموذج نطاق الطاقة، تقدر ببضع إلكترونات فولتية. وتعوق بذلك حركة ناقلات الشحنة، وحيث إن الطبقة المستخدمة من الأكسيد فى الترانزيستور رقيقة جدا فإن حاملات الشحنة تخترق هذه الطبقة بميكنة العبور النفقى الكمى. ونظرا لأن معامل العبور النفقى للإلكترون يفوق كثيرا عما هو للشغرة فإن طبقة أكسيد النحاسوز تسمح للإلكترونات بالمرور خلالها بصورة أسهل من سماحها للشغرات بالمرور. يؤدى هذا إلى الحد من حقن الشغرات إلى الباعث، ومن ثم زيادة هائلة فى تكبير التيار.

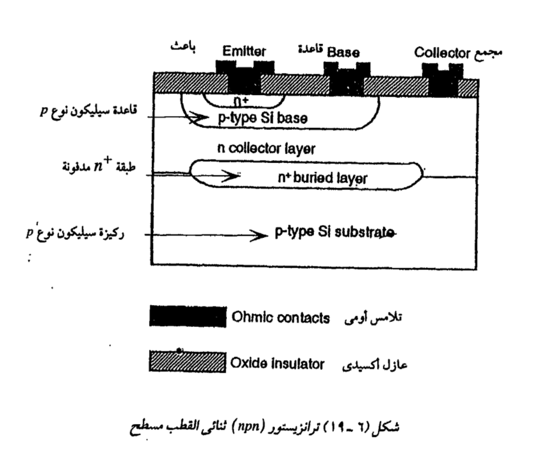
يمكن استثمار الزيادة الهائلة فى تكبير التيار باستخدام أى من الطرق السابقة، لتحسين خواص أخرى فى الترانزيستور. على سبيل المثال، فى تلك الترانزيستورات التى تم تحسين تكبيرها للتيار، يمكن زيادة درجة إشابة القاعدة والعودة بمعامل التكبير إلى قيمتها الأصلية التى كانت عليها قبل التحسين وذلك بغرض إنقاص مقاومة القاعدة بما يؤدى إلى زيادة سرعة أداء النبيطة، ومكون النتيجة أنه فى الترانزيستور ثنائى القطب ذى الوصلة أو الوصلات غير المتجانسة أو ذى باعث متعدد البلّورة يمكن تحسين سرعة أداء الترانزيستور على حساب معامل التكبير العالى.

وتبقى مقاومة القاعدة من المقاومة الأومية فى رقعة الاتصال الكهربية بين سطح القاعدة والموصل المعدنى الخارجى، شكل (٦ ـ ١٩) كمقاومة فرعية نتيجة مشكلات فنية عند تثبيت الوصلات الخارجية.

كما أنه يمكن اختزال إشابة الباعث بغرض زيادة سمك طبقة النضوب من ناحيته ويؤدى هذا بدوره إلى اختزال السعة الكهربية فى هذه الطبقة وكل ذلك أيضا على حساب معامل التكبير العالى فى الترانزيستور ذى الوصلة غير المتجانسة.



شكل (٦ ـ ١٨) ترانزيستور (npn) ذو باعث متعدد التبلّور .



شكل (٦ ـ ١٩) ترانزيستور (npn) ثنائى القطب مسطح

لحساب النقص فى معامل التكبير β فى نسق الباعث المشترك نعلم من العلاقة (39 – 6) أن:

$$\beta = \frac{\alpha_0}{1-\alpha_0}$$

حيث a_0 معامل التكبير فى نسق القاعدة المشتركة ويعطى بعلاقة سابقة (40 - 6):

$$\alpha_0 = \left(1 - \frac{D_p p_{no} W_B}{D_n n_{Po} L_{PE}}\right)\left(1 - \frac{W_B^2}{2L_{nB}^2}\right)$$

وإذا غلب حقن الشغرات عبر وصلة الباعث ـ قاعدة فى الترانزيستور، تتأثر قيمة β وتصبح:

$$\beta \approx \frac{D_n p_{Po} L_{PE}}{D_p p_{no} W_B} \qquad 6-44$$

عند إشابة الباعث تتقلص فجوة الطاقة E_g فيه وتنكمش بالقدر ΔE_g ويمكن حساب التغير فى كثافة الشغرات من القيمة $p_{no}(E_g)$ إلى القيمة $p_{no}(E_g - \Delta E_g)$ من خلال تغير كثافة الحاملات الذاتية وتصبح:

$$p_{no}\ (E_g - \Delta E_g) = p_{no}(E_g)\exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \qquad 6-45$$

وبالتعويض عن هذا التركيز فى العلاقة (44 – 6) تصبح:

$$\beta = \frac{D_n n_{Po} L_{PE}}{D_p p_{no} W_B}\exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \qquad 6-46$$

وحيث إن:

$$\frac{n_{Po}}{p_{no}} = \frac{n_{no}}{p_{Po}} = \frac{N_D}{N_A}$$

يصبح التكبير β بدلالة (مستويات) الإشابة N_A, N_D فى العلاقة:

$$\beta = \frac{D_n N_D L_{PE}}{D_P N_A W_B} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \qquad 6-47$$

تبين هذه العلاقة مدى النقص الحادث فى تكبيـر التيار من جراء إشابة الباعث فى ترانزيستور ثنائى القطب متجـانس الوصلة. ونقدر قيمة الأنكماش ΔE_g فى فجوة طاقة السيليكون:

$$\Delta E_g(Si) = 22.5 \left(\frac{N_d}{10^{18}} \cdot \frac{300}{T(K)}\right)^{1/2} \text{ meV} \qquad 6-48$$

أما فى الترانزيستور ثنائى القطب ذى الوصلة غيـر المتجانسة فإن المقدار ΔE_g يمثل الفرق بين فجوتى الطاقة فى الباعث والقاعدة وتصبح:

$$\beta = \frac{D_n N_D L_{PE}}{D_P N_A W_B} \exp\left(\frac{\Delta E_g}{k\,T}\right) \qquad 6-49$$

مع بقاء الشرط $L_n >> W_B$.

مثال (٦ ــ ٩):

ترانزيسـتور *(npn)* ثـنائى القطـب من السيـليكون، تتغـير فيه إشـابة البـاعث بين $10^{18} - 10^{20}\ cm^{-3}$. احسب التغير فى تركيز الشواغر فى الباعث عند $300\ K$.

الحل:

تتقلص فجوة الطاقة فى نسبة موصل السيليكون طبقا للعلاقة:

$$\Delta E_g = 22.5 \left(\frac{N_D(cm^{-3})}{10^{18}} \cdot \frac{300}{T(K)}\right)^{1/2} \text{ meV}$$

$$\Delta E_g \quad (10^{18}\ cm^{-3}) \simeq 0.022\ eV$$

$$\Delta E_g \quad (10^{22}\ cm^{-3}) \simeq 0.225\ eV$$

فى غياب أى تقلص لفجوة الطاقة فى السليكون، يكون:

$$n_i^2 = 2.2 \times 10^{20}\ cm^{-3}$$

وتقل مع انكماش فجوة الطاقة، وباستخدام العلاقة:

$$p_{no} = \frac{n_i^2}{n_{no}} \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right)$$

والتعويض عن $n_{no} = 10^{18}\ cm^{-3}$، نحصل على:

$$p_{no} = 5.22 \times 10^{2}\ cm^{-3}$$

والتعويض عن $n_{no} = 10^{20}\ cm^{-3}$، نحصل على:

$$p_{no} = 1.26 \times 10^{4}\ cm^{-3}.$$

أى أنه فى حالة الإشـابة العالية للبـاعث تزداد كثافـة الشغرات فـيه بدلا من أن تنقص وتتأثر بذلك كفاءة الباعث تأثرا شديدا وتقل كفاءته.

مثال (٦ ــ ١٠):

ترانزيسـتـور *(npn)* ثـنـائى القـطـب مـن *Ga As*. فيـه $N_D = 5 \times 10^{17}\ cm^{-3}$، $N_A = 10^{17}\ cm^{-3}$. قارن بين كفاءة هذه النبيطة وكـفاءة نبيطة أخرى مماثلة الإشابة ولكن ذات وصلات غيـر متجـانسة، ويتكون الباعث فـيها من $Al_{0.3}\,Ga_{0.7}\,As$ والقاعدة من *Ga As* علما بأن الترانزيستور يتميز بما يلى:

$$D_n = 100\ cm^2\ s^{-1},\ D_p = 15\ cm^2\ s^{-1}.$$

$$W_B = 50\ \mu m,\ \ DE_g = 0.36\ eV,\ \ L_p = 1.5\ \mu m.$$

الحل:

في حالة شبه موصل *Ga As* تكون:

$$n_i = 2.2 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$$

$$\therefore p_{no} = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(2.2 \times 10^6)^2}{5 \times 10^{17}} = 9.7 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_{Po} = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(2.2 \times 10^6)^2}{10^{17}} = 4.84 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-3}$$

وتكون كفاءة الباعث:

$$\gamma = \left(1 - \frac{p_{no} D_n W_B}{n_{Po} D_P L_P}\right)$$

$$= 1 - \frac{(9.7 \times 10^{-6})(15)(0.5 \times 10^{-4})}{(4.84 \times 10^{-5})(100)(1.5 \times 10^{-4})} = 0.99$$

وفى حالة الوصلة غير المتجانسة تنخفض قيمة p_{no} بشدة لتصبح:

$$p_{no}(\text{Al}_{0.3}\text{ Ga}_{0.7}\text{ As}) = \frac{n_i^2 \, (Ga\,As)}{N_D} \; exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right)$$

$$= p_{no}\,(\text{Ga As}) \;\; exp\left(-\frac{\Delta E_g}{KT}\right)$$

وبالتعويض عن هذه الكميات نحصل على:

$$p_{no}(\text{Al}_{0.3}\text{ Ga}_{0.7}\text{ As}) = 9.4 \times 10^{-12} \text{ cm}^{-3}$$

وبذلك ترتفع كفاءة الباعث.

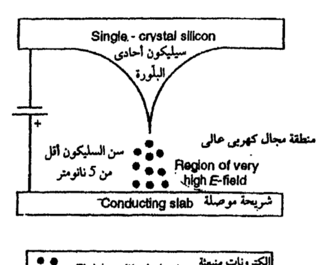
(٦-١٣) الإلكترونيات الدقيقة المفرغة

Vacuum Micro Electronics

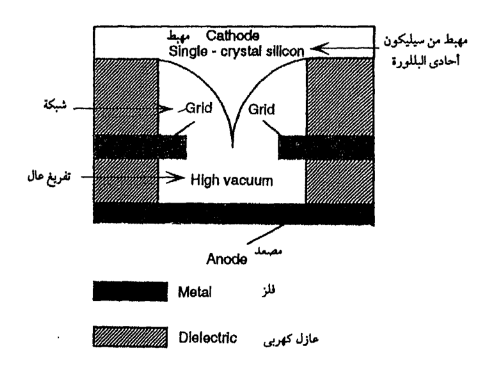
يعتمد الترانزيستور الحالى فى أدائه على حركة ناقلات الشحنة من إلكترونات وشغرات تحتاج فى اندفاعها داخل شبه الموصل إلى مجال كهربى. بفعل هذا المجال تصل سرعات انسياق الحاملات حدا لا تتخطاه وتعرف بحد التشبع، وقد يكون ذلك غير مستحب عند تصنيع نبائط تتطلب أداء فائق السرعة، يستلزم الأمر اختيار مواد أخرى غير السيليكون للحصول على سرعات انسياق أكبر إلا أنها تظل صغيرة مقارنة بسرعة الضوء فى الفراغ. إضافة لذلك تؤدى التصادمات بين الشحنات ونقاط الشبيكة إلى تولد حرارة تكفى لتدمير النبيطة وخاصة عند استخدام التيارات الكهربية الكبيرة، كما أن وجود نوعين من الشحنة، إلكترونات وشغرات وما يتبعها من ظاهرة الحاملات الأقلية غير المرغوب فيها - تولد سعة كهربية بالانتشار، يؤدى بدوره إلى إبطاء عمل النبيطة.

مما تقدم يتبين وجود أوجه قصور تحد من أداء الترانزيستور ثنائى القطب وتبقيه نبيطة غير مثالية.

هناك نبائط إلكترونية، تتحرك فيها حاملات الشحنة (الإلكترونات) بسرعة تقرب من سرعة الضوء. لا يعوق حركتها شبيكة بلورية، وبانعدام الشبيكة لن يكون هناك ظواهر حرارية معوقة أو تلف إشعاعى من جراء تشعيع نووى، وتنعدم الأخطاء الطفيفة كما فى نبائط الذاكرة. تعرف هذه النبائط بالصمامات. إلا أن مفهوم هذا الصمام يختلف عما كان من قبل فى حالة الصمامات الإلكترونية المفرغة حيث كانت الشحنات تولد بظاهرة الانبعاث الثرميونى داخل أنبوبة زجاجية مفرغة، تشغل حيزا ضخما فى الفراغ وتحتاج إلى قدرة كهربية عالية لتشغيلها. أما الصمامات البديلة والجديدة فتعرف بالصمامات الإلكترونية الدقيقة الخوائية (المفرغة)، تقدر أبعاد حجمه الصغير المتناهى بالميكرون وتتولد الشحنات فيها بتأثير مجال كهربى شديد يؤثر عند سن معدنى مدبب بشكل حاد بظاهرة انبعاث المجال، شكل (٦ - ٢٠). كما يبين شكل (٦ - ٢١) نموذجا لهذا الصمام، ارتفاعه فى حدود 100 μm . يحتاج عمله إلى إنماء بلورى فائق الدقة مع إبراز سن مدبب حاد باستخدام تقنية حفر التآكل فى السيليكون وثانى أكسيد السيليكون.



شكل (٦ ـ ٢٠) انبعاث إلكترونى بتأثير المجال



Microelectronic 'valve'

شكل (٦ ـ ٢١) صمام إلكترونى دقيق

(٦ ـ ١٤) ملخص الفصل

فى هذا الفصل أخذنا على عاتقنا نمذجة استجابة الترانزيستور ثنائى القطب الوصلى عند وصلة الاستقرار.

فى البداية أجرينا تحليلا مشابها لتحليل الثنائى المثالى بغرض الحصول على توزيع حاملات الأقلية فى القاعدة وبارمترات الأداء والتيارات الخارجية. ثم قمنا بتبسيط العلاقات العامة.

بالإضافة إلى سعة النضوب السابق ذكرها فى الفصل السابق تعرضنا لمواسعة الانتشار والتى ترتبط أساسا بحقن حاملات الشحنة الأقلية، وتتبعنا بشىء من التفصيل التيارات السارية فى الترانزيستور وتم ربطها بالمعاملات التى يشاع استخدامها للتعامل مع كفاءة النبيطة ومنها كفاءة الباعث ومعامل انتقال القاعدة والاتساع الفعال لها وناقشنا ظاهرة الاختراق الكلى.

بعد ذلك قمنا باستعراض أنماط التشغيل المختلفة مثل النشط، التشبع، القطع. وأخيرا النمط المقلوب.

وتم ربط بارامترات الأداء بالكميات الطبيعية داخل النبيطة مثل معاملات الانتشار وتركيزات حاملات الأقلية والاتساع الفعال للقاعدة وأطوال الانتشار. كما أشرنا إلى تردد القطع وهو أقصى تردد بعده يفقد الترانزيستور كفاءته.

وفى نهاية الفصل تم استعراض بعض الأساليب لتحسين كسب التيار مثل كبت حقن حاملات الأقلية إلى الباعث.

أسئلة الفصل

١ ـ ارسم شكلا تخطيطا يمثل نطاقـات الطاقة وكـذا بروفيل المجال الـكهربى فى ترانزيستور n^+pn ،p^+np ثنائى القطب فى حالتى:

(أ) اتزان حرارى.

(ب) انحياز أمامى فى نمط التشغيل النشط.

٢ ـ بين أنه فى ترانزيستور npn ثنائى القطب وذى فجـوة طاقة ضيقة ومـساحة مقطع A للنبيطة، تعطى فائض الشحنة المحقونة بالعلاقة:

$$Q = \left\{\left[exp \quad \frac{qV_{BE}}{kT} - 1\right] + \left[exp\left(- \frac{qV_{CB}}{kT} \right) - 1\right]\right\}$$

٣ ـ ارسم العـلاقة بين عـامل نقل القـاعدة كـدالة للنسبـة $\frac{W_B}{L_n}$ فى المدى $1 > \frac{W_B}{L_n} > 10^{-2}$ بفرض أن كفاءة الباعث تساوى الوحدة وذلك فى ترانزيستور npn ثنائى القطب. بين كيف يتغير معامل تـكبير التيار فى نسق المشترك فى نفس المدى المذكور.

٤ ـ فى ترانزيستور npn ثنائي القطب، احسب وارسم اعتماد كفاءة الباعث على النسبة $\frac{N_A}{N_D}$ فى المدى $1 > \frac{N_A}{N_D} > 10^{-2}$ وذلك باعتبار:

(أ) $W_B = L_n \quad , \quad L_P = L_n \quad , \quad D_P = D_n$

(ب) $W_B = 0.1\ L_n \quad , \quad L_P = 0.2\ L_n \quad , \quad D_P = 0.2\ D_n$

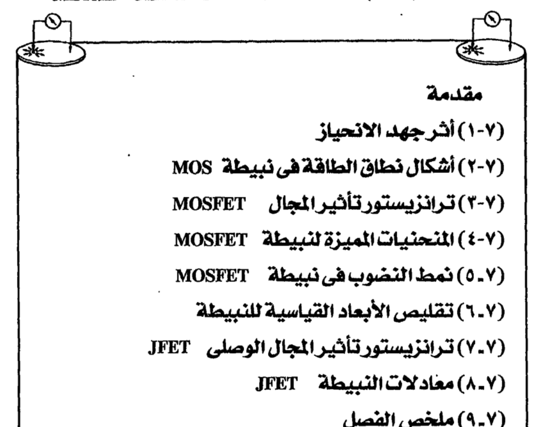
٥ ـ ترانـزيستور npn ثنائى القطب من السليكون، زاد تصحيـحه بحيـث تكـون كفاءة الباعث γ عند 300 K تساوى 0.995 فإذا كان سـمك القاعدة $W_B = 0.5$ µm، طول الانتشار $L_P = 10\ W_B$، ومعاملا الانتشار $D_n = D_P$ وإشابة الباعث $N_D = 1019$ cm^{-3}. احسب الإشابة المطلوبة فى القاعدة.

٦ ـ احسب تردد القطع فى نبيطة BJT، إذا كان زمن عبـور القاعدة يمثل 20% من زمن التأخـير الكلى لانتقال الـشحنات. علما بأن اتساع القـاعدة 0.5 µm ومعامل الانتشار $D = 25\ cm^2\ s^{-1}$.

الفصل السابع

النبيطه «فلز ـ أكسيد فلز ـ شبه موصل»

METAL - OXIDE - SEMICONDUCTOR (MOS) DEVICE



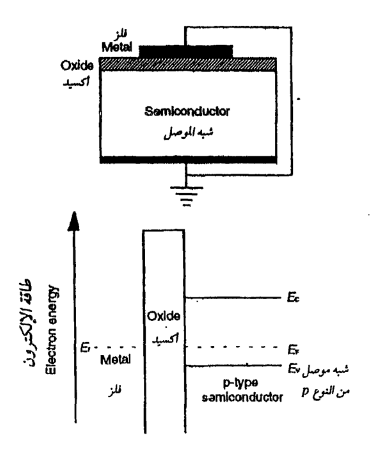


مقدمة

فى هذه النبيطة يتم تنمية طبقة رقيقة من أكسيد فلز على سطح ركيزة شبه موصل من النوع n أو النوع p، ثم يتم وضع قطب فلزى (معدنى) فوق سطح طبـقة الأكسيد، ويختار الأكسيـد من مادة جيدة العزل الكهربى، تكون فيها فجـوة الطاقة كبيرة، وتكون وظيفة هذه الطبقة هى عزل الفلز عن شبه الموصل فلا يمر بينها تيار كهربى.

تعمل هذه النبيطة كثنائى يعرف بالثنائى "MOS" (نسبة إلى الأحرف الأولى من الترجمة الإنجليزية للمكونات)، كما أنهـا تمثل نوعا من أنواع المكثفات الكهربية وتسمى بمكثف "MOS". يوضح شكل (٧ ـ ١) رسمـا لتركيب هذه النبـيطة مع تركيب نطاق الطاقة فـيهـا عند حالة الاتزان الحرارى. ونـلاحظ أنه فى غياب فـرق الجهـد الكهربى وانعدام المجال عـبر طبقة الأكـسيد، تبدو قـمة نطاق الطاقة فيـه مستوية وأفقـية، وعند تطبيق جهد كهربى على سـطح الفلز وتوصيل شبه الموصل بالأرض يميل السطح الأفقى لقمة نطاق طاقة الأكسيد بزاوية ميل تعتمد على اتجاه الجهد المسلط وقيمته. ويبين الرسم العلوى فى الشكل أن الفلز انغلق مـع شبه الموصل فى دائرة مـقصرة. بذلـك تقع طاقة فرمى عند مستوى واحـد فى كل من الفلز وشبه الموصل، ويمثل بالخط المنقط $E_F - E_F$ ولا يمر تيار كهربى فى أى اتجاه. وكذلك يلاحظ أن نطاقات الطاقة فى شبه الموصل هى الأخرى أفقيـة ومستوية عند حالة الاتزان الحرارى. تـعرف عندئذ بحالة «النطاق المسطح للطاقة»، ومن وجهة النظر الفيزيائية لا يكون هناك مجالات كهربية مؤثرة فى هذه الحالة كمـا تنعدم توزيعـات الشحنة الكهـربية وإلا كـان هناك انحناء فى نطاقات الطـاقة عند الاتزان وفى الواقع ، قد يحتوى الأكسيد شحنات عرضية تؤدى إلى انحناء نطاق الطاقة فى شبه الموصـل حتى فى حالة الاتزان الحرارى. إضـافة لذلك، توجد أيضا مـستويات إلكترونية نشطة عند السطح البينى لشبه الموصل والأكـسيد تعرف بحالات السطح البينية التى توصف بدقة بميكانيكا الكم، إلا أننا لن نخوض فى هذه التـفاصيل. ولذلك تعرف هذه النبيطة بالثنائي "MOS" المثالى، حـيث لم يؤخذ فى الاعتـبار شحنات الأكـسيد ومسـتويات السطح البينى وكـذلك التوصيل الكهـربى بالتسرب. وإذا افـترضنا أن لدينا بعض الشحنات فى الأكسيد وتسـبب انحناءه لنطاق الطاقة فى شبه الموصل يمكننا عندئذ تطبيق بعض الفولتات على سطح الفلز كى تعادل الأثر الناتج من شحنات الأكسيد ومن

ثم استعادة تسطح مستوى نطاق الطاقة مرة أخرى. يسمى مقدار الجهد المسلط فى هذه الحالة بجهد النطاق المسطح، ويمكننا قياس هذا الجهد للتعرف على كمية الشحنة الموجودة فى الأكسيد ومنه نتبين نوع الأكسيد.



شكل (٧ ـ ١) ثنائى (MOS) مثالى فى حالة إتزان حرارى

(٧-١) أثر جهد الانحياز

يوضح لنا شكل (٧ ـ ٢) رسما تخطيطيا لتركيب نبيطة فلز ـ أكسيد ـ شبه موصل MOS مثالى، يؤثر عليها جهد انحياز عند سطح الاتصال الفلزى (المعدنى). مع تغيير قيمة جهد الانحياز واتجاهه تنشأ فى النبيطة ثلاث حالات مختلفة هى النضوب، والانقلاب، والتكدس.

٧ـ١ـ١ النضوب Depletion

فور تطبيق جهد انحيار سالب عند سطح القطب الفلزى تتكون كمية صغيرة من الشحنات السالبة عندها، شكل (٧ ـ ٢ أ). تمنع طبقة الأكسيد مرور أى تيار كهربى، إلا أن الإلكترونات الموجودة فى ركيزة السيليكون ذى النوع n سوف تتأثر بتلك الشحنات السالبة وتبتعد متنافرة عن المنطقة الموجودة تحت القطب الفلزى وتنشأ بذلك منطقة نضوب شبيهة بتلك التى تنشأ فى الوصلة $p\ n$. فى هذه المنطقة تنضب الحاملات الحرة وتنفذ.

عندئذ، تبدو طبقتا الفلز والأكسيد كما لو تمثلا بلوح واحد فى مكثف متوازى اللوحين، تكون فيه طبقة شبه الموصل هى اللوح الثانى يفصل بينهما طبقة عازلة هى طبقة النضوب. من هنا سميت النبيطة بمكثف MOS. وفى هذه الحالة يمكن اعتبار طبقة النضوب امتدادًا لسمك طبقة الأكسيد هذا على الرغم من أن كلتا الطبقتين لهما ثابتين نفاذية مختلفة. تقل السعة الكهربية للمكثف MOS كلما دفعنا النبيطة نحو النضوب بفعل جهد سالب صغير. يمكن حساب سعة هذا المكثف من العلاقة:

$$C_{OX} = \varepsilon_{OX} \frac{A}{d_{OX}} \qquad 7-1$$

حيث:

C_{OX} تمثل السعة المقاسة بالفاراد، Farad

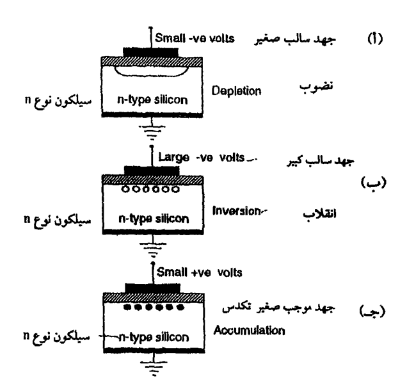
A مساحة سطح المكثف cm^2.

d_{OX} سمك طبقة الأكسيد cm.

ε_{OX} ثابت النفاذية للأكسيد ويمكن تعيينه من العلاقة:

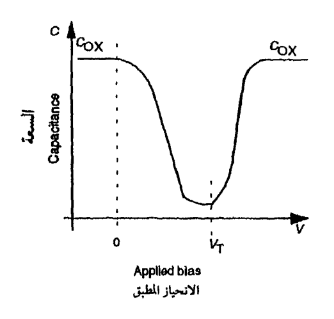
$$\varepsilon_{OX} = \varepsilon_O K_{OX} \qquad 7-2$$

حيث K_{ox} ثابت النفاذية النسبى للأكسيد، ε_O ثابت نفاذية الفراغ ($\varepsilon_O = 8.854 \times 10^{-14}$ F/ cm).



شكل (٧ ـ ٢) ثنائى MOS مثالى على ركيزة من النوع n فى الحالات:

(أ) النضوب (ب) الانقلاب (جـ) التكدس



شكل (٧ ـ ٣) منحنى ٧ ـ ٢ المميز لثنائى MOS مثالى وفيه يمثل V_T قيمة جهد العتبة

مثال (٧ ــ ١):

احسب السعة الكهربية للأكسيد فى النبيطه MOS، إذا كان قطر سطح الاتصال الفلزى 2mm وسمك الأكسيد 100 nm .

الحل:

بالتعويض عن قيم المعطيات فى المعادلة:

$$C_{OX} = \frac{(8.854 \times 10^{-14})\ (3.9)\ (3.14)\ \ (0.1)^2}{10^{-5}} = 1.1\ \text{nF}$$

٧ـ١ـ٢ الانقلاب Inversion

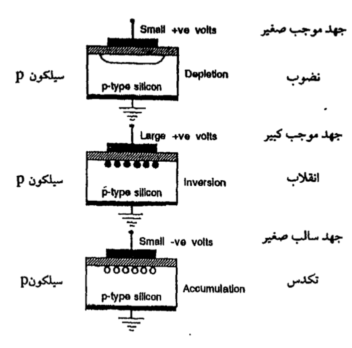
وجد عمليًا أنه ليس من الممكن الاستمرار فى زيادة الجهد السالب عند سطح القطب المعدنى فى شكل (٧ ـ ٢ ب) ودفع رقعة النضوب أكثر فأكثر داخل شبه الموصل، فمن وجهة نظر الطاقة يكون مستحبا للشغرات أن تتجمع عند السطح البينى للأكسيد وشبه الموصل بدلا من الاطراد فى زيادة سمك طبقة النضوب وحين يحدث ذلك، تعرف النبيطة بأنها فى حالة انقلاب وذلك لتغير نوع الشحنات إلى النقيض عند التقاء الأكسيد بشبه الموصل ويصبح هناك وفرة من تلك الحاملات الحرة للشحنة، وهى فى هذه الحالة شغرات موجبة تأتى من الحاملات الأقلية الموجودة فى شبه الموصل n عند درجة الحرارة المعنية وتتجمع فى بئر الجهد أسفل سطح القطب الفلزى عند الانقلاب.

قد يحدث أن تنشأ منطقة نضوب بطريقة سريعة بتأثير نبضة جهد سريعة يمكن بها دفع طبقة النضوب إلى مواضع عميقة داخل السيليكون قبل أن تتوافر للشغرات فرصة للزحف نحو السطح البينى لتكوين طبقة الانقلاب. بهذه الوسيلة يمكن بالفعل دفع منطقة النضوب داخل السيليكون إلى مدى أبعد مما يسمح به الانقلاب، بشرط أن يتم ذلك بسرعة فائقة، وتسمى هذه العملية بالنضوب العميق.

٧ـ١ـ٣ التكدس (تراكم) Accumulation

عند التأثير على سطح القطب الفلزى فى النبيطة بجهد موجب، تنجذب الحاملات الأغلبية السالبة الشحنة فى السيليكون n وتتكدس عند السطح البينى للأكسيد وشبه الموصل وتكون السعة الكهربية عندئذ هى سعة الأكسيد عند التكدس، شكل (٧ ـ ٢جـ).

ويبين شكل (٧ ـ ٣) المنحنى المميز $C - V$ لنبيطة MOS مثالية. كما يبين شكل (٧ ـ ٤) رسما لهـذه النبيطة فى ركيزة من شـبه موصل من النوع p، وسوف تبرز أهمـية النبيط الأخيرة عند دراسة النمط المحسن من ترانزيستور تأثير المجال.



شكل (٧ ـ ٤) ثنائى MOS مثالى على ركيزة من النوع p فى الحالات:
(أ) النضوب (ب) الانقلاب (جـ) التكدس

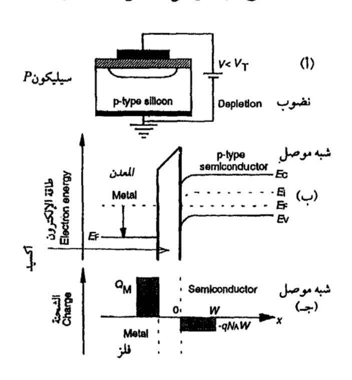
(٧ـ٢) أشكال نطاق الطاقة فى نبيطة MOS

Band Digrams in MOS Device

مقارنة لما سبق، نستعـرض حالات النضوب والانقلاب والتكدس فى حالة نبيطة MOS على ركيزة سيليكون من النوع p. يؤدى تأثير جهد صـغير موجب على سطح القطب الفلزى إلى نضوب الحـاملات الأغلبية (الشـغرات) عند السطح البينى للأكـسيد وشبه الموصل، شكل (٧ ـ ٥ أ)، إضـافة إلى ذلك يمثل شكل (٧ ـ ٥ ب) نطاق الطاقة للنبيطـة. وعند التأثير بالجـهد الموجب يتـحرك مسـتوى طاقة فـيرمى E_F من موضـعه الابتدائى فى حالة الاتزان الحـرارى إلى أسفل. كما يوضحـه الشكل. ويمثل ميل الخط

المستقيم عند نطاق الطاقـة فى الأكسيد، الجهد المؤثر عبر طبقـة الأكسيد. وينحنى نطاق الطاقة الخاص بشـبه الموصل قرب السطح البينى له مع الأكسـيد، ونظرا لأنه تحت تأثير دفع المجال الكهربى تهبط الإلكترونات إلى أسفل بئر الجهد بينما تطفو الشغرات لأعلاه. كما نجـد أن فى نموذج النطاق الموضح، أن الشغرات تتـحرك مبتعـدة عن السطح البينى وتنشأ طبقة النضوب. يبين شكل (٧ ـ ٥ جـ) توزيع الشحنات لهـذه الحالة وفيها تتعادل الشحنات السالبة فى وحدة المساحات qN_AW ـ مع الشحنات الموجبة فى وحدة المساحات Q_M عند سطح القطب الفلزى وذلك بفـرض انعدام أى مصادر أخـرى للشحنات. يمثل W سمك طبقة النضوب، ويلاحظ أن مستوى طبقة فرمى فى شبه الموصل يكون مستويا وأفقيا كما يتوقع، حيث لا يمر تيار عبر طبقة الأكسيد.

مع زيادة الجهد الموجب عند سطح القطب الفلزى إلى قيمة أعلى من جهد العتبة ينقلب شبه الموصل وتحـتل الإلكترونات المكان مكونة طبقة الانقـلاب عند السطح البينى للأكسيـد مع شبه الموصل، شكل (٧ ـ ٦أ). ومع استـمرار زيادة الجهد الموجب يسـتمر هبوط مستوى طاقة فيرمى فى الفلز ويزداد ميل سطح نطاق الطاقة فى الأكسيد كما يزداد انحناء نطاق الطاقة فى شبه الموصل. شكل (٧ ـ ٦ ب).



شكل (٧ ـ ٥) ثنائى MOS مثالى فى حالة النضوب

وتعطى كثافة الشحنة الإلكترونية n كدالة للفرق بين مستويى طاقتى فرمى $(E_F - E_i)$ بالعلاقة $(5 - 10)$:

$$n = n_i \quad exp \; \frac{E_F - E_i}{kT} \qquad 5 - 10$$

وحيث إن:

$$\because \; E_F - E_i > 0 \qquad 7 - 3$$

$$\therefore \; n > n_i \qquad 7 - 4$$

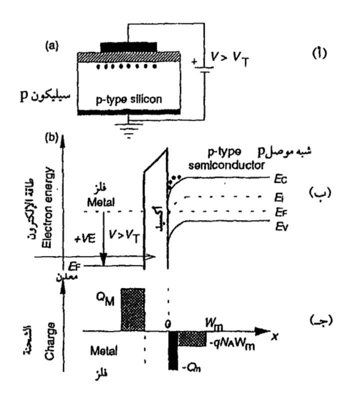
$$\therefore \; p < p_i \qquad 7 - 5$$

ينقلب سطح شبه الموصل لتفوق عدد الإلكترونات على عدد الشغرات ويكون سمك طبقة الانقلاب صغيرا جدا، حيث يتراوح بين 1.0 – 10 nm . يمثل سمك طبقة النضوب W_m فى هذه الحالة أقصى قيمة لها؛ ذلك لأنه بمجرد تكون طبقة الانقلاب فإن طبقة النضوب تبلغ سمكها الأقصى وأى زيادة أخرى فى الشحنات تظهر فى شحنة طبقة الانقلاب فقط. ويبين شكل (٧ ـ ٦ جـ) تعادل الشحنة الموجبة Q_M عند سطح القطب الفلزى مع شحنة طبقة الانقلاب السالبة qN_AW وشحنة طبقة النضوب Q_n.

$$Q_M = qN_AW + Q_n \qquad 7 - 6$$

والتأثير بالجهد السالب على سطح القطب الفلزى شكل (٧ ـ ٧أ) يفرز نطاقات طاقة وفق النموذج الممثل فى شكل (٧ ـ ٧ب)، يرتفع فيه مستوى فرمى E_F فى الفلز إلى أعلى عن موضعه الأصلى (الذاتى) عند الاتزان الحرارى، ويأخذ ميل نطاق الطاقة عند الأكسيد وضعا معكوسا لتبدل الانحياز عما كان عليه فى الحالتين السابقتين. ينعكس أيضا اتجاه الانحناء فى نطاق الطاقة فى شبه الموصل قرب السطح البيني له مع الأكسيد ويتجه لأعلى، وكما سبق فإنه لا يمر تيار فى الأكسيد ويبقى مستوى فرمى ثابتا فى شبه الموصل. تتغير كثافة الحاملات الأغلبية للشحنة p كدالة للفرق $(E_i - E_F)$ وفقا للعلاقة $(7 - 5)$.

$$p = n_i \quad exp \; \left(\frac{E_i - E_F}{kT} \right) \qquad 5 - 7$$



شكل (٧ ـ ٦) ثنائى MOS مثالى فى حالة الانقلاب

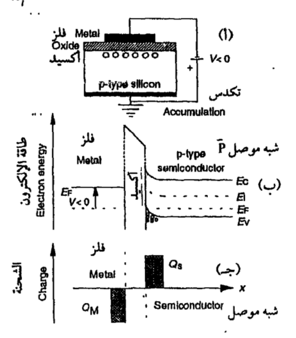
ونتيجة لانحناء نطاق الطاقة لأعلى، تزداد قيمة $E_i - E_F$ وبذلك تزداد كثافة الشغرات مع زيادة الجهد السالب عند سطح النبيطة ويؤدى ذلك إلى حالة التكدس. فى هذه الحالة تتعادل الشحنة السالبة Q_M للشغرات عند السطح البينى لشبه الموصل والأكسيد كما فى شكل (٧ ـ ٧ جـ). ويبين شكل (٧ ـ ٨) رسما لنبيطة MOS على ركيزة سيليكون من النوع p فى حالة تُعرَف بالانقلاب الحاد V_{inv} وفيها تحدث أقصى إزاحه لمستوى الطاقة E_F حيث تتحرك بشكل متماثل بين موضع فوق مستوى E_i وقريبا من السطح إلى موضع آخر تحت مستوى E_i بعيدا عن السطح، وتصبح بذلك:

$$V_{inv} = 2V_P \quad \mathbf{7-8}$$

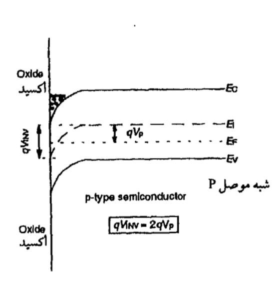
وحيث إنه فى الوصلة $p\,n$ تتعين V_p من العلاقة (8 – 5):

$$V_p = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} \qquad 5-7$$

$$\therefore V_{inv} = \frac{2kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} \qquad 7-9$$



شكل (٧ـ ٧) ثنائى MOS مثالى فى حالة التكدس



شكل (٧ ـ ٨) الانقلاب الحاد وإزاحة طاقة فرمى E_F

مثال (٧ ــ ٢):

احسب أقصى قيمة لسمك طبقة النضوب W_m فى ثنائى *MOS* على ركيزة سيليكون p علما بأن $N_A = 5 \times 10^{15}\ cm^{-3}$.

الحل:

لحساب W_m يمكن استعمال نفس معادلة سمك شحنة الفراغ فى وصلة $(p-n)$ المبتوره ـ معادلة $(41-5)$:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}\, V_{bi}}{2N_D}} \qquad 5-41$$

وكى تتمشى هذه المعادلة مع طبقة النضوب فى شبه الموصل p فى الثنائى *MOS* نأخذ فى الاعتبار ما يلى:

(أ) استبدال كثافة الإشابه N_A بكثافة الإشابة N_D.

(ب) استبدال جهد الانقلاب $(2V_p)$ بجهد البناء الداخلى V_{bi}.

(جـ) استبدال أقصى قيمة لسمك طبقة النضوب W_m فى حالة الانقلاب الحاد بقيمة السمك W. وبذلك تئول العلاقة السابقة إلى:

$$W_m = 2\sqrt{\frac{\varepsilon_{Si}\, V_P}{2N_A}} \qquad 7-10$$

بالتعويض عن:

$$V_P = \frac{kT}{q}\ exp\ \frac{N_A}{n_i}$$

$$= 25 \times 10^{-3}\ exp\ \frac{5 \times 10^{15}}{1.4 \times 10^{10}} = 0.32\ \ V$$

ويصبح أقصى سمك:

$$W_m = 2\sqrt{\frac{(8.854 \times 10^{-14})\ (11.9)\ (0.32)}{(1.6 \times 10^{-19})\ (5 \times 10^{15})}} = 0.41\ \ \mu m$$

مثال (٧ ـ ٣):

استنتج معادلة لحساب جهد العتبة فى ثنائى MOS مثالى.

الحل:

عند عتبة طبقة الانقلاب يصبح جهد القطب الفلزى V_T مساويا مجموع جهد الشريط المنحنى $V_{inV}\ (= 2V_P)$ وجهد شحنة طبقة النضوب V_{dep} ذات السمك W_m، أى أن:

$$V_T = 2V_P + V_{dep} \qquad 7-11$$

ولكن:

سعة طبقة الأكسيد

$$V_{dep} = \frac{Q_{dep}}{C_{OX}} \quad ، \quad C_{OX} = \frac{\varepsilon_{OX}}{d_{OX}}$$

$$V_T = 2V_P + \frac{Q_{de}}{C_{OX}} \qquad 7-12$$

وبالتعويض عن:

$$Q_{dep} = -q\,N_A\,W_m = -2\sqrt{\varepsilon_{Si}\,V_P\,q\,N_A}$$

يمكن الحصول على العلاقات التالية:

$$V_T = 2V_P + \frac{q\,N_A\,W_m\,d_{OX}}{\varepsilon_{OX}} \qquad 7-13$$

$$V_T = 2\left(V_P + \frac{1}{C_{OX}}\sqrt{\varepsilon_{Si}\,V_P\,q\,N_A}\right) \qquad 7-14$$

وتستخدم فى حساب قيمة العتبة فى حالة الانقلاب.

مثال (٧ ـ ٤):

احسب جهد العتبة V_T لثنائى MOS مثالى من سيليكون p، إذا علم أن:

$$N_A = 5 \times 10^{15} \quad cm^{-3} \quad , \quad d_{OX} = 120 \text{ nm.}$$

الحل:

من نتائج المثال السابق نعلم أن:

$$V_P = 0.32 \text{ V} \quad , \quad W_m = 0.41 \text{ µm.}$$

$$\therefore V_T = 2 V_P + \frac{q N_A W_m d_{OX}}{\varepsilon_{OX}}$$

بالتعويض عن قيم هذه الكميات نحصل على:

$$\therefore V_T = 2\,(0.32) + \frac{(1.6 \times 10^{-19})\,(5 \times 10^{15})\,(0.41 \times 10^{-4})\,(1.2 \times 10^{-5})}{(3.9)\,(8.854 \times 10^{-14})}$$

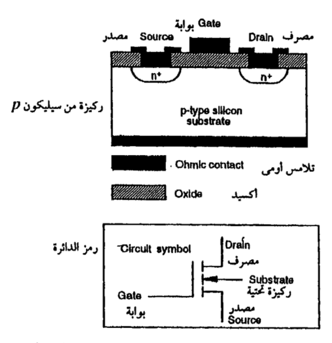
$$= 1.78 \quad V$$

(٧ ـ ٣) ترانزيستور تأثير المجال (MOSFET)

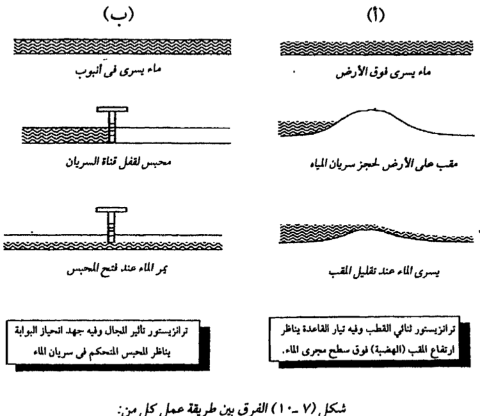
Metal Oxide Semiconductor – Field Effect Transistor

فى هذه النبيطة يتم إقحام الثنائى MOS داخل ترانزيستور تأثير المجال كما يوضحه شكل (٧ ـ ٩) ويسمى باسم "MOSFET". وما قد عُرف من قبل بالقطب الفلزى عند السطح فى النبيطة MOS يعرف الآن بالبوابة فى النبيطة MOSFET فى هيئتها الخاصة والتى يطلق عليها نبيطة النمط المقوى للقناة ـ n.

ويلاحظ أنه فى حالة انعدام الانحيار عند البوابة يكون هناك فى شبه الموصل منطقتان مشابتان إشابة عالية n^+ تعرفان على الترتيب بالمصدر والمصرف وتنفصلان عن بعضهما بمنطقة شبه موصل p وتشبهان فى ذلك ثنائيان يتصلان ببعضهما ظهرا بظهر كما ورد من قبل فى شكل (٦ ـ ٥). البوابة فى نبيطة MOSFET تشبه القاعدة فى ترانزيستور ثنائي القطب، فهو قطب يتحكم فى تيارات كبيرة للغاية تنساب فى دائرة بين المصدر والمصرف وتقارن بذلك بالتيار الكهربى المنساب بين الباعث والمجمع، ويبين شكل (٧ ـ ١٠) الفرق بين طريقتى عمل كل من ترانزيستور المجال والترانزيستور ثنائى القطب.



شكل (٧ ـ ٩) النمط المقوى لنبيطة MOSFET ذات القناة n



شكل (٧ ـ ١٠) الفرق بين طريقة عمل كل من:
(أ) ترانزيستور ثنائي القطب.
(ب) ترانزيستور تأثير المجال.

أما شكل (٧ ـ ١١) فيبين نبيطة MOSFET وقد تم توصيلها بمصدرى جهد كهربى، أحدهما لدائرة بين المصدر والمصرف والآخر كجهد انحياز للبوابة. عند غياب جهد البوابة ينعزل المصدر عن المصرف ولا يمر بينهما تيار كهربى إلا بقدر ضئيل جدا يعرف بتيار التسرب العكسى. وإذا أثرنا بجهد موجب على البوابة وزيد من هذا الجهد إلى ما فوق جهد العتبة، تتكون طبقة انقلاب من إلكترونات التوصيل تحت البوابة (وهذا ما يفسر معنى القناه n فى التسمية الواردة للنبيطة). ويلاحظ أن طبقة الانقلاب فى هذه النبيطة تتكون بصورة أسهل بكثير عنها فى حالة النبيطة MOS وذلك لاحتواء النبيطة MOSFET على منطقتين مشابتين إشابة عالية n^+ وقريبتين من بعضهما البعض، وقادرتين على الإمداد بوفرة هائلة من الإلكترونات إلى طبقة الانقلاب خلال تكونها.

تصل طبقة الانقلاب المصدر بالمصرف بشكل فعال وتسمح للتيار الكهربى أن يمر بينهما. وتؤدى زيادة جهد الانحيار على البوابة إلى دفع مزيد من الشحنات فى طبقة الانقلاب وهذا بدوره يزيد من التيار المار بين المصدر والمصرف، ومن هنا ورد لفظ «النمط المقوى» فى تسمية النبيطة.

وفى حالة النضوب، تعمل النبيطة MOSFET على توصيل التيار الكهربى دون حاجة إلى جهد انحيار البوابة، وتكون الحاجة إلى هذا الجهد فقط لمنع مرور التيار.

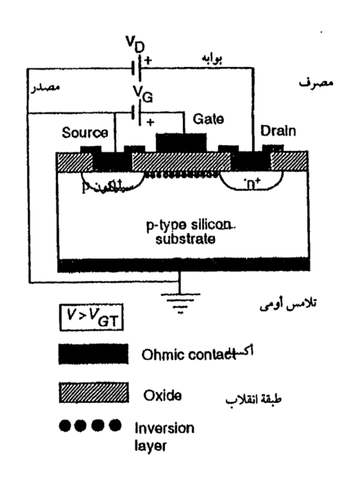
ويلاحظ فى شكل (٧ ـ ١١) أن جهد انحياز المصرف يكون موجبا بالنسبة للمصدر فيصبح المصدر عندئذ مصدرا للإلكترونات نتيجة إشابته السالبة العالية n^+ فيمر تيار الإلكترونات من المصدر إلى المصرف ويمر التيار الاصطلاحى (التقليدى) بالعكس، أى من المصرف إلى المصدر. يتضح من ذلك أنه يمكن استخدام النبيطة MOSFET كمفتاح «سويتش» عن طريق جهد انحيار البوابة، كما يتضح أن هناك تكبير ملموس فى شدة التيار الكهربى (لافتراض عدم مرور تيار فى البوابة لوقوعها على سطح عازل) ومن ثم تكبير ملموس فى القدرة الكهربية. وتشبه النبيطة لترانزيستور ثنائى القطب الوصلى، غير أن الطرف الثالث والذى عرف بالبوابة لا يسحب تيارا كهربيا بالفعل، ويبين شكل (٧ ـ ١٢) المنحنيات المميزة $(I - V)$ لنبيطة النمط المقوى للترانزيستور MOSFET.

(٧-٤) المنحنيات المميزة لنبيطة MOSFET

MOSFET Characteristics

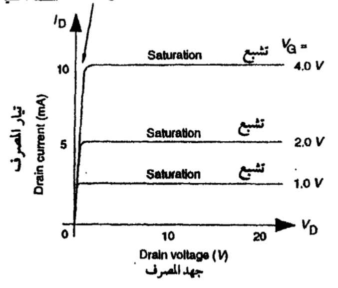
٧-٤-١ التحليل النوعى للمنحنيات المميزة

يبين شكل (٧ - ١٣) النمط المحسن ذا القناة n للترانزيستور MOSFET وهو يعمل فى المدى الخطى. يوجد على البوابة جهد أكبر قليلا من جهد العتبة V_T وبذلك تتكون طبقة انقلاب موصلة عند القيم الصغيرة من الجهد الواقع بين المصدر والمصرف تبدو طبقة الانقلاب كما لو كانت شريحة مادية ذات مقاومة أومية عادية تتعين بالعلاقة $V = IR$ ونحصل بذلك على علاقة خطية للمنحنى المميز $I - V$ عند قيم صغيرة من جهد المصرف V_D.

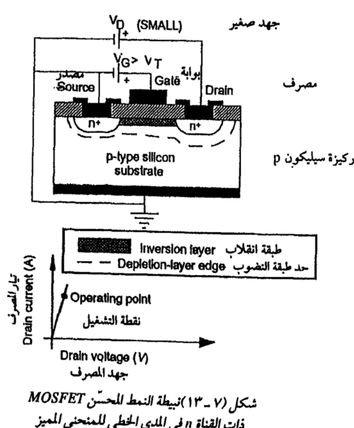


شكل (٧ - ١١) انحياز المصرف وتكون طبقة الانقلاب فى النبيطة MOSFET





شكل (٧ ـ ١٢) المنحنيات المميزة للنبيطة MOSFET
ذات القناة n

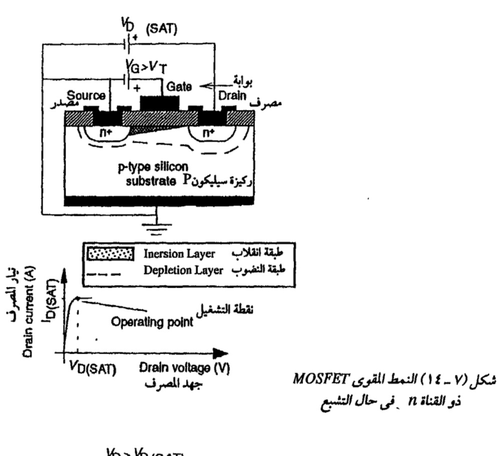


شكل (٧ ـ ١٣) نبيطة النمط المحسّن MOSFET
ذات القناة n فى المدى الخطى للمنحنى المميز

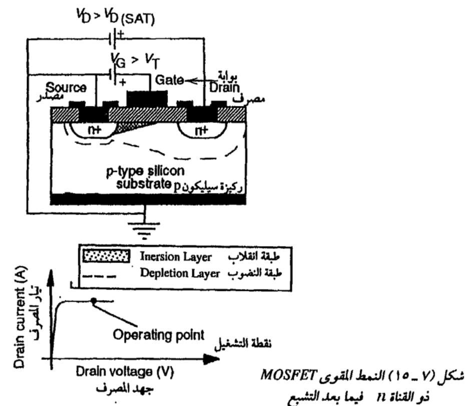
ويبين شكل (٧ ـ ١٤) النبيطة MOSFET عند بدء تيار التشبع بها والتى تناظر $V_{D(sat)}$. إذا اقترب هذا الجهد من القيمة $(V_a - V_T)$ يصبح الجهد على الأكسيد ناحية المصرف غير كاف للابقاء على طبقة الانقلاب فتختفى. تعرف هده الحالة بجهد القطع التخصرى. من جهة أخرى تظل طبقة الانقلاب باقية ناحية المصدر ويرجع السبب فى ذلك إلى وجود المصدر عند جهد صفرى، الأمر الذى يجعل الأكسيد ناحية التقائه بالمصدر متأثرا بفرق الجهد الكلى الناتج من جهد البوابة. فإذا فرض أن الجهد الواقع على طول طبقة الأكسيد يتغير تغيرا خطيا فإن سمك طبقة الانقلاب تتغير تغيرا خطيا من القيمة صفر ناحية المصرف إلى أقصى قيمة لها ناحية المصدر كما يظهر فى الشكل (٧ ـ ١٤). ويلاحظ وجود طبقة نضوب فى شبه الموصل p قرب التصاقه بالمصرف نتيجة لزيادة الجهد الموجب عليه. ونجد أنه على الرغم من تقلص طبقة الانقلاب إلى الصفر ناحية المصرف، يستمر تيار التشبع $I_{D(sat)}$ فى الانسياب عند جهد القطع التخصرى وذلك عند استمرار زيادة جهد المصرف V_D.

ويبين شكل (٧ ـ ١٥) نبيطة MOSFET عند $V_D > V_{D(sat)}$ وفيها يتحرك جهد القطع التخصرى نحو المصدر مبتعدا عن المصرف. غير أن قيمة هذا الجهد تظل ثابتة دون تغير، بذلك تبقى هناك منطقة صغيرة بين مؤخرة طبقة الانقلاب، عند نقطة القطع والمصرف، خالية من الشحنات وتمثل منطقة نضوب وعلى الرغم من ذلك فإنها لا تعوق فيض الإلكترونات المنساب من المصدر إلى المصرف ويشبه ذلك ما يحدث من انسياب حاملات الشحنة عبر منطقة النضوب فى الوصلة $p\ n$، فى الترانزيستور ثنائى القطب. وتكون طول منطقة النضوب فى نبيطة MOSFET عادة صغيرة جدا ويصبح المجال عبرها شديدا للغاية فيعمل على تسريع (تعجيل) الإلكترونات من حافة القطع التخصرى فى طبقة الانقلاب إلى المصرف (حيث يكون المصرف متأثرا بقدر من الجهد الموجب بينما يكون المصدر عند جهد صفرى). وتبلغ شدة المجال المؤثر على الإلكترونات من القوة بحيث تصل سرعة الدفع إلى قيمة التشبع فى وقت وجيز للغاية. وتتعين شدة التيار بالعلاقة:

$$I_d = n\,A\,v_d\,q \qquad 7-15$$



شكل (٧ ـ ١٤) النمط المقوى MOSFET
ذو القناة *n* في حال التشبع



شكل (٧ ـ ١٥) النمط المقوى MOSFET
ذو القناة *n* فيما بعد التشبع

فـإذا بلغـت السرعة v_d حد التشبع $v_{d(sat)}$ يصل التيار I_d أيضا إلى حد التشبع $I_{d(sat)}$ وذلك بفـرض ثبات قـيمـة كثـافة الشـحنة n التى تصل من المصدر إلـى منطقة القطع التخـصرى. وهذا بدوره يتوقف على قـيمة الجهـد عند نقطة القطع وهذه القيمـة تبقى ثابتة. أى أنه فور أن يصل جـهد المصرف إلى $V_{D(sat)}$ أو يزيد يتشبع التـيار ويثبت عند قيمته $I_{d(sat)}$ ويعرف عندئذ بتيار المصرف المتشبع. بالتعويض عن قيمة v_d بدلالة تحركية الإلكترون μ_n وشدة المجال $\mathcal{E}$ فى العلاقة $v_d = \mu_n \mathcal{E}$ نحصل على:

$$I_d = n A \mu_n \mathcal{E} q \qquad 7-16$$

بمعرفة طول طبقة الانقلاب L يمكن استبدال شدة المجال $\mathcal{E}$ بقيمة الجهد V_{po} عند نقطة القطع التخـصرى فى طبقـة الانقلاب من العلاقة $\mathcal{E} = \frac{V_{PO}}{L}$ وبذلك يصـبح تيار التشبع:

$$I_d = \frac{n A \mu_n V_{PO} q}{L} \qquad 7-17$$

تبين هذه العلاقة أن تيار التـشبع يظل ثابتا بثبوت كل من جهـد القطع التخصرى V_{PO} وطول طبقة الانقلاب L. فإذا انكمش الطول L نتيجة زيادة جهد المصرف V_D فإن التيار I_d سوف يزداد ولا يحدث التـشبع. ويمكن التغلب على ذلك إذا كـان طول طبقة الانقلاب كبيرا جدا بحيث لا يتأثر بأى تغير طفيف فيه مع زيادة قيمة جهد المصرف V_D فيبـقى التيار I_d ثابتا. أمـا إذا تم تصنيع نبيطةMOSFET سـريعة للغـاية بإقحام بوابة قصيرة الطول لإنقاص زمـن العبور عبر الترانزيستور فإنه يمكن مـلاحظة زيادة شدة التيار I_d مع جهـد المصرف V_D. وفى الواقع تصنع النبيطة MOSFET ببوابة طولهـا واحد ميكرون أو أقل.

٧-٤-٢ التحليل الكمى للمنحنيات المميزة

فى هذا التحليل سـوف نستعين أولا بالنبـيطة المقواة MOSFET ذات قناة سالبة من النوع n وتعمل فى المنطقة الخطية (حيث تكون قيمة V_D صغيرة).

عندما يرتفع جهد البوابة فوق قيمة جهـد العتبة تنشأ طبقة الانقلاب وتصبح Q_n شحنة هذه الطبقة لكل وحدة مساحات.

$$Q_n = -\ C_{OX}\,(V_G - V_T) \qquad 7-18$$

تمثل C_{OX} السعة الكهربية لبوابة الأكسيد. وذلك عند $V_G > V_T$. وإذا لم يتحقق الانقلاب. أى عندما تكون $V_G < V_T$ فإن الشحنة تنعدم وتصبح:

$$Q_n = 0 \qquad 7-19$$

وإذا اعتبرنا شكل (٧ ـ ١٦) حـيث تعمل النبيطة MOSFET فى المنطقة الخطية نجد أن مقاومة القناة تنـقص كلما زادت قيمة V_G بسبب زيادة Q_n. ولو تصورنا محور الإحداثيات z يختـرق عموديا مسـتوى هذه الصفحـة، وكان طول القناة L فإنه طبـقا للعلاقة $(J_X = \sigma\mathcal{E})$ فإن:

$$I_D = A\,\sigma\,\mathcal{E} = (zx)\,nq\,\mu_n\mathcal{E} \qquad 7-20$$

حيث تمثل σ موصلية القناة (البوابة) بوحدات S/m.

بالتعويض عن شحنة طبقة الانقلاب لوحدة المساحات نحصل على:

$$I_D = z\,(-Q_n)\,\mu_n\mathcal{E} \qquad 7-21$$

وبذلك تكون قيمة تيار السحب:

$$I_D = \frac{z\,\mu_n\,C_{OX}\,(V_G - V_T)\,V_D}{L} \qquad 7-22$$

ويمكن الحصول على الناقلية (المواصلة) الكهربية من العلاقة·

$$g_D = \left.\frac{\delta I_P}{\delta V_D}\right|_{V_O} = \frac{z\mu_n \acute{C}_{OX}\,(V_G - V_T)}{L} \qquad 7-23$$

فإذا كانت V_D كبيـرة بدت لنا قـناة (بوابـة) التوصيل بالقطع التخصـرى كما فى شكل (٧ ـ ١٧). ونظرا للتغير الخطى لطبقة الانقلاب عبر طول القناة L يمكن استخدام القيمة المتوسطة من Q_n لإيجاد قيمة تيار السحب. وبفرض تدفق تيار التشبع، تصبح:

$$I_{D(SAT)} = z\,(-Q_n)_{av.}\,\mu_n\,\mathcal{E} \qquad 7-24$$

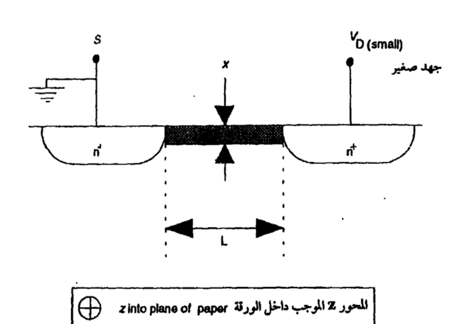
$$I_{D(SAT)} = z\,\acute{C}_{OX}\,\frac{(V_G - V_T)}{2}\,\mu_n\,\frac{V_G - V_T}{L} \qquad 7-25$$

$$I_{D(SAT)} = \frac{z\,\acute{\mu}_n\,C_{OX}\,V^2_{D(sat.)}}{2L} \qquad 7-26$$

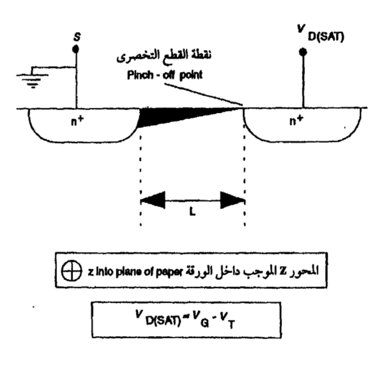
ويمكن حساب ما يعرف بالناقلية المتعدية g_m (Transconductance) عند التشبع بتطبيق العلاقة:

$$g_{m\,(sat)} = \frac{\delta I_D}{\delta V_G} = \frac{z\,\mu_n \acute{C}_{OX}\,(V_G - V_T)}{L} \qquad 7-27$$

الناقليه العادية هى قـسمة التيار عند موضع ما على فـرق الجهد فى نفس الموضع بينما الناقليه المتعدية هى قسمة التيار عند موضع ما على فرق الجهد فى موضع آخر.



شكل (٧ ـ ١٦) نبيطة MOSFET
ذات القناة *n* في المدى الخطي



شكل (٧ ـ ١٧) نبيطة MOSFET
ذات القناة *n* عند جهة القطع التحضري

مثال (٧ ـ ٥):

إذا كانت:

السعة الكهربية لبوابة الأكسيد =	F/m	4×10^{-4}
عرض القناة =	μm	50
طول القناة =	μm	5
حركية الإلكترون في القناة =	cm^2/Vs	750
جهد البوابة =	V	6
جهد العتبة =	V	1.5

احسب:

(أ) الناقلية المتعدية عند التشبع.

(ب) التكبير في حالة المصدر المشترك بحمل مقاومته $R_L = 25K\,\Omega$. إذا علمت أن هذا التكبير يعطى بالعلاقة $(-g_{m\,(sat)}\,R_L)$.

الحل:

(أ) باستخدام المعادلة (27 ـ 7):

$$g_{m\,(sat)} = \frac{(50 \times 10^{-6})\,(750 \times 10^{-4})\,(4 \times 10^{-4})\,(6 - 1.5)}{(5 \times 10^{-6})}$$

$$= 1.35 \times 10^{-3} \quad S$$

(ب) التكبير في حالة المصدر المشترك:

$$gain = -\,g_{m\,(sat)}\;R_L$$

$$= (-\,1.35 \times 10^{-3}) \times (25 \times 10^{3}) = -\,33.75$$

(٥ـ٧) نمط النضوب فى النبيطة MOSFET

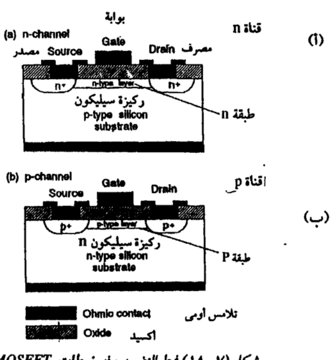
MOSFET Depletion Mode

يبين شكل (٧ ـ ١٨) التركيب الأساسى للنبيطة *MOSFET* ذات القناة *n* في نمط النضوب وفيها قناة الوصل بين المصدر والمصرف. ويتم ذلك بإشابة المنطقة أسفل بوابة الأكسيد عند تصنيع النبيطة. والآن مع وجود قناة التوصيل فى موضعها فإن النبيطة MOSFET فى نمط النضوب تقوم بالتوصيل ذاتيا بين المصدر والمصرف دون تطبيق أى جهد انحيار على البوابة. بذلك تكون هذه النبيطة فى حالتها العادية فى وضع الغلق (ON)، بينما يكون الأمر فى وضع التوقف (OFF) فى حالة النمط المحسن للنبيطة. وعلى ذلك يلزم تطبيق جهد انحيار سالب على بوابة النبيطة MOSFET ذات القناة *n* فى نمط النضوب لقطع الاتصال بين المصدر والمصرف. (ويقدم شكل (٧ ـ ١٨ب) نفس النمط فى النبيطة ذات القناة *p*.

وكما هو العهد فى حالة نبيطة النمط المحسن تئول قناة التوصيل فى نمط النضوب إلى حالة القطع التخصرى مع زيادة قيمة V_D. يبين شكل (٧ ـ ١٩) بالتفصيل ما يحدث حول منطقتى المصدر والمصرف، فمع انعدام انحياز البوابة وتطبيق جهد انحيار موجب كبير على المصرف تظهر منطقة النضوب كما فى الشكل. تكون رقعة النضوب كبيرة حول المصرف لوجود انحيار عكسى على الثنائى n^+p، حيث تمثل ركيزة الترانزيستور الجزء *p* من الثنائى. وينشأ هبوط متوقع فى الجهد الكهربى بين المصرف والمصدر الموجود عند جهد قيمته صفر. وبذلك تنكمش طبقة النضوب بالاتجاه نحو المصدر.

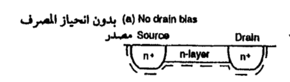
عند قيم أعلى لجهد انحيار المصرف تمتد طبقة النضوب خلال القناة *n* ويحدث لها قطع تخصرى قرب حافة المصرف.

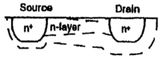
ويلخص شكل (٧ ـ ٢٠) الحالات الأربعة المختلفة للنبيطة المعنية ومنحنيات $(I - V)$ المميزة لكل من هذه الحالات:



شكل (٧ ـ ١٨) نمط النضوب فى نبيطات MOSFET بنوعيها p,n

MOSFET SCALING





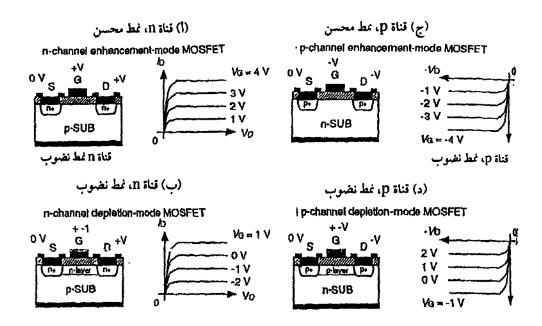
انحياز مصرف يعلو القطع التخصرى (c) Drain bias above pinch - off

Source Drain

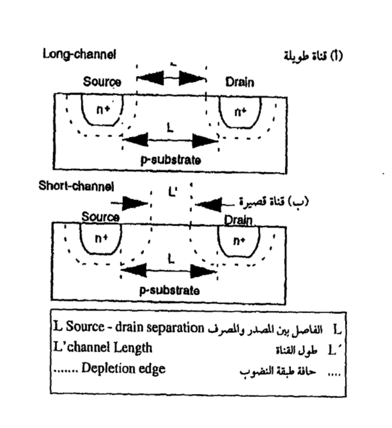
n+ n-layer n+

-- Depletion Layer edge حافة طبقة النضوب

شكل (٧ ـ ١٩) نمط النضوب فى نبيطة MOSFET ذات القناة n عند القطع التخصرى



شكل (٧ ـ ١٨) نمط النضوب في نبيطات MOSFET بنوعيها p,n



شكل (٧ ـ ٢١) أثر القناة القصيرة

(٦-٧) الأبعاد القياسية للنبيطة MOSFET Scaling

تؤدى الحاجة إلى بيطات ذات سرعة أداء فائقة وكذلك الحاجة إلى نبيطات أكثر فى أحد مجالات استخدام السيليكون إلى تصغير النبيطة بقدر الإمكان عند تصنيعها. إلا أن هناك مشاكل عدة تنشأ كلما آل حجم النبيطة إلى الصفر.

فعلى سبيل المثال يمكن اختزال طول القناة لاختصار زمن عبور الشحنات بين المصدر والمصرف. ويبين شكل (٧ ـ ٢١) نبيطة *MOSFET* بقناة طويلة وأخرى بقناة قصيرة ويتضح من الشكل ازدياد طبقة النضوب فى حالة القناة القصيرة. فإذا حدث وكان مجموع سمكى طبقتى النضوب عند المصدر والمصرف مساويا لطول القناة، تندمج طبقتا النضوب. وتنشأ حالة الانهيار الكلى، وتفقد البوابة السيطرة على تيارها وبذلك يفشل عمل النبيطة.

يمثل الانهيار الكلى فى النبيطات ذات القناة القصيرة المشكلة الأساسية التى تواجه تقليص حجم النبيطة. ويمكن التغلب جزئيا عليها بزيادة تركيز إشابة الركيزة فيتقلص سمكى طبقتى النضوب حول كل من المصدر والمصرف.

إضافة إلى ذلك هناك مشكلة الإلكترونات الساخنة. فعند تصغير طول القناة تزداد شدة المجالات الكهربية المؤثرة ما لم يتم إنقاص الجهد الكهربى. هذه المجالات الكهربية العالية تعجل حاملات الشحنة وتمدها بطاقات عالية لتزداد حركيتها ويطلق عليها عندئذ «الإلكترونات الساخنة»، وهذه تأخذ طريقها داخل بوابة الأكسيد وتستوطن فيها كشحنات فائضة بالأكسيد فتؤثر بدورها على جهد النطاق المسطح، ومن ثم تغير فى منحنيات $(I-V)$ المميزة للنبيطة وتغير خصائصها مع الزمن فتصبح النبيطة بذلك معيبة ويلزم استبعادها من الاستخدام.

من هذه المناقشة نجد أنه للحصول على نبيطة MOSFET قياسية لزم اختزال قيمتى الأطوال والجهود الكهربية بمعامل قياسى s بحيث تظل قيمة شدة المجالات الكهربية دون تغير عن حالة القناة الطويلة. وبتطبيق ذلك نجد أن سعة الأكسيد لوحدة المساحات C_{OX} تصبح:

$$\overline{C}_{OX} = \frac{\varepsilon_{Si}}{(d_{OX}/s)} = s\, C_{OX} \quad , \mathrm{F/cm^2} \qquad 7-28$$

وتصبح سعة بوابة الأكسيد.

$$\bar{C}_{OX}\ .A = (sC_{OX})\ \left(\frac{L}{s}\right)\ \left(\frac{z}{s}\right) = \frac{C_{OX}\ .A}{s} \qquad 7-29$$

حيث تمثل L طول البوابة، z سمكها.

كما يصبح تيار المصرف المشبع:

$$\bar{I}_{D\,(sat)} = \left(\frac{z}{s}\right) = \frac{\mu_n\, s\, C_{OX}\,(V_G - V_T)^2}{(2L/s)\, s^2} = \frac{I_{D\,(sat)}}{s} \qquad 7-30$$

وتصبح كثافة هذا التيار:

$$\bar{J}_{D\,(sat)} = \frac{I_{D\,(sat)}}{A} = \left(\frac{s^2}{A}\right) \frac{I_{D\,(sat)}}{s} = s\, J_{D\,(sat)} \qquad 7-31$$

ويمكننا استنتاج أعلى قيمة لتردد التشغيل للنبيطة على النحو التالى:

إذا كانت الإلكترونات تعبُر البوابة بسرعة دفْع (انسياق) مشبعة $v_{D\,(sat)}$

فإن زمن العبور يصبح:

$$t_{tr} = \frac{L}{v_{D\,(sat)}} \qquad 7-32$$

ويكون أقصى تردد للتشغيل:

$$f_T = \frac{v_{D\,(sat)}}{L} \quad Hz \qquad 7-33$$

وبتطبيق قواعد القياس تصبح

$$\bar{f}_{tr} = \frac{v_{(sat)}}{(L/s)} = s f_{tr} \qquad Hz \qquad 7-34$$

وتتأثر باقى عناصر النبيطة بهذه العملية فتبدو كما يلى:

القدرة المستنفذه تقاس (توزن) بالمعامل $(1/s^2)$.

ناتج القدرة المتخلفة تقاس بالمعامل $(1/s^3)$.

القدرة المستنفذه لوحدة المساحات تعاير بمقدار الوحدة فلا تتأثر.

والعنصر الوحيد الذى يتأثر بالزيادة فى هذه العملية القياسية هو كثافة تيار التشبع، حيث تتضاعف بقيمة المعامل القياسى s؛ ولذلك وجب أن نحتاط من مشاكل انسياب الشحنات الكهربية وهجرتها المتدفقة فى النبيطات المتقلصة.

٧-٧) ترانزيستور تأثير المجال الوصلى JFET

Junction Field Effect Transistor

تمثل هذه النبيطة نوعا آخر للترانزيستور ڤولطى التحكم الانسياقى أحادى القطب. ويمثل شكل (٧ ـ ٢٢) شكلا تخطيطيا للنبيطة JFET ذات قناة n (أى سالبة القناة).

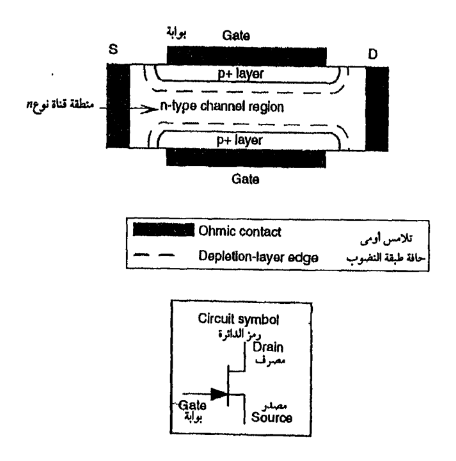
ويتطلب الأداء الفائق للنبيطة دفع الإلكترونات فى الدائرة وأنسب ما يكون لذلك هو ترانزيستور تأثير المجال الوصلى بحيث تتقلص المسافة بين المصدر والمصرف إلى أدنى مسافة ممكنة.

تمثل النبيطة JFET فى شكلها البسيط قطعة من السيليكون المقاوم، يتغير قدرة توصيل القناة بها بتطبيق جهد انحيار عكسى عند طرف البوابة. وتبدو ممانعة دخل النبيطة عالية بسبب التحكم عن طريق الانحيار العكسى لوصلة البوابة ويكون التيار المار بالكاد هو تيار التسرب العكسى للوصلة pn.

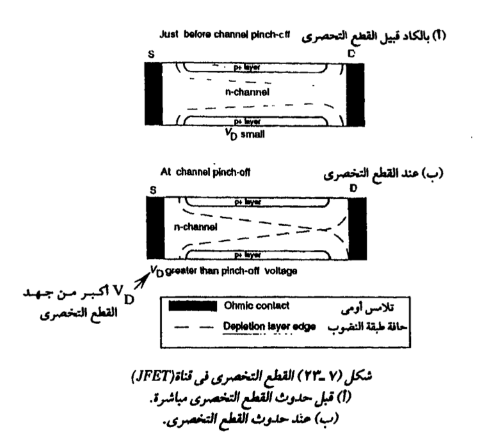
ويتعين علينا قبل الخوض فى أمر هذه النبيطة وتطبيق أى جهد انحيار على البوابة أن نستعرض حالة القطع التخصرى عند ازدياد جهد المصرف كما كان الحال من قبل مع النبيطة MOSFET

يبين شكل (٧ ـ ٢٣) كيـفية زيادة منطقة النـضوب فى النبيطة ناحيـة المصرف مع ازدياد قيمـة جهده الموجب، إلا أن هذه المنطقة تتـقلص منكمشة على هيـئة ذيل رقيق، قاعدته ناحية المصدر .

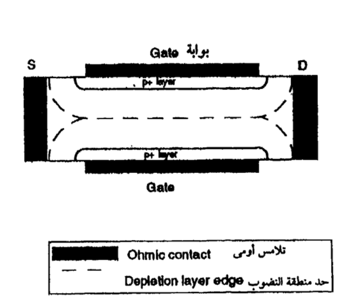
وإذا استمر الجهد الكهربى للمصرف فى الزيادة يحدث أن تلتقى منطقتى النضوب ناحية المصرف ويسبب قطع تخضـرى للقناة، شبيه بذات القطع فى النبيطة MOSFET. ويستـمر مرور الـتيار دون توقف عند القطـع التخصـرى ويصبح متـشبـعا. وعند زيادة الانحيـار العكسى على البوابة، يقل سـمك قناة التوصيل حـتى تلتقي منطقتـا النضوب ويقطع توصيل القناة، فـلا يمر تيار من المصدر إلى المصرف ويبطل عـمل النبيطة، شكل (٧ ـ ٢٤).



شكل (٧ ـ ٢٢) رسـم تـخـطيطى لـترانزيـستور تأثير المجال ـ الوصلى (JFET)



شكل (٧ ـ٢٣) القطع التخصرى فى قناة(JFET)
(أ) قبل حدوث القطع التخصرى مباشرة.
(ب) عند حدوث القطع التخصرى.



شكل (٧ ـ٢٤) تأثير جهد انحياز البوابة العكسى الكبير

ويفسر ذلك التوقف بأن الانحيـار العكسى على البوابة يبلغ من الكبر بحيث يبنى حائط جـهد يمنع مـرور حاملات الشـحنة، الأمر الذى لا وجود له عند الـتأثير بجـهد المصرف وحده.

يمثل شكل (٧ ـ ٢٥) منحنيات $(I - V)$ المميزة للنبيطة JFET بالقناة n. ويتضح فيها أن حالة تشـبع التيار (القطع التحضرى) يحدث عند قيم صغـيرة من جهد المصرف كلما زاد الانحيـار العكـسى للبوابة، ويبطل عمل النبيطة بتـوقف تيار الصرف مع الزيادة الشديدة لـلانحيار العكـسى للبوابة. يبين هذا السلوك أهمـية تأثيـر المجالات الكهـربية «وليست طبقة النضـوب» فى طريقة عمل النبيطة، حيث تتوقف حـركة ناقلات الشحنة أساسا على تأثير المجالات الكهربية.

(٧ـ٨) معادلات النبيطة JFET

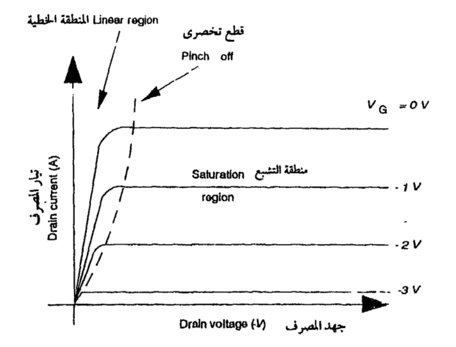
JFET Equations

لإيجاد العلاقة بـين قيمتى V, I للنبيطة المعينـة نستعين بشكل (٧ ـ ٢٦)، الذى يشير إلى مرور تيار سحب ووجود فرق جهد على القناة فى اتجاه المحور y بينما المحور z يتجه عموديا على مستوى الورقة.

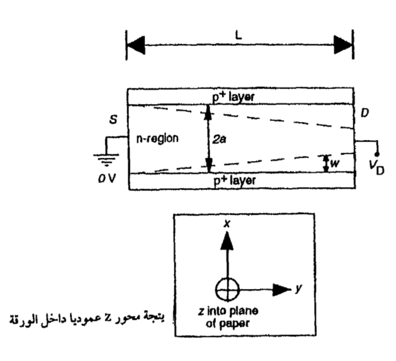
يؤدى فرق الجـهد بين طرفى النبيطة إلـى تولد طبقة نضـوب ذات سمك يقل فى الاتجاه من المصـرف إلى المصدر. فإذا كان شبـه الموصل ذا إشابة n (نبيطة ذات قناة n) وكانت البـوابة ذات إشابة p^+ عاليـة التركـيز فإننا نحـصل بذلك على وصلة p^+n بين البوابة والقناة. وقـد وجد من قبل أن العـلاقة بين سمك طبقـة النضوب W والجهد V المؤثر على الوصله المبتورة أحادية الجانب وفقا للمعادلة $(5 - 41)$ هى:

$$W = \left(\frac{\varepsilon_{Si} V}{q N_D}\right)^{1/2} \qquad 5 - 41$$

ذلك مع إهمال قيمة الجهد الصغير المبيت داخليا بالنبيطة.



شكل (٧ ـ ٢٥) منحنيات $I - V$ المميزة للنبيطة (JFET) ذات القناة n



شكل (٧ ـ ٢٦) مخطط لاستنتاج $I - V$

إذا كانت V_P تمثل جهد القطع التخصرى اللازم لقطع التوصيل بالكاد عبر القناة، فإنه بالتعويض عن قيمة W بالقيمة a التى تمثل نصف قمة القناة ينتج أن:

$$V_P = \frac{qN_D a^2}{2\varepsilon_{Si}} \qquad 7-35$$

مع ملاحظة أن V_P سالبة فى الترانزيستور ذات القناة n. من هاتين المعادلتين نحصل على:

$$W = a \left(\frac{V}{V_p}\right)^{1/2} \qquad 7-36$$

ومن الشكل (٧ ـ ٢٦) يمكن حساب التغير فى قمة (شدة) توصيل القناة h عبر طولها من العلاقة:

$$h = 2(a - W) \qquad 7-37$$

وبدلالة الجهد الكهربى تصبح هذه العلاقة:

$$h = 2a\left[1 - \left(\frac{V}{V_p}\right)^{1/2}\right] \qquad 7-38$$

وبما أن تيار السحب I_D يعطى بالعلاقة:

$$I_D = -\sigma A \mathcal{E}_y \qquad 7-39$$

حيث تمثل σ موصلية القناة، بالتعويض عن قيمتى شدة المجال $\mathcal{E}_y$ عبر القناة ومساحتها A من العلاقات:

$$\mathcal{E}_y = \frac{dV}{dy} \quad , \quad A = hz \qquad 7-40$$

فإن :

$$I_D = -\sigma\, h\, z\, \frac{dV}{dy} \qquad 7-41$$

ومنها :

$$\int_{O}^{L} I_D\, dy = -\int_{-V_G}^{(V_D - V_G)} \sigma\, h\, z\, dV \qquad 7-42$$

وقد أمكن تعيين حدود التكامل من اعتبار النبيطة ذات القناة n. بها جهد انحياز عكسى قيمته $-V_G$ على البوابة وجهد موجب قيمته V_D على المصرف وبذلك نجد أنه :

عند $y = 0$ يكون $V = -V_G$

عند $y = L$ يكون $V = V_D - V_G$

بالتعويض عن h تصبح :

$$I_D = -\frac{2\,\sigma\, h\, z}{L} \int_{-V_G}^{(V_D - V_G)} \left[1 - \left(\frac{V}{V_P}\right)^{1/2} \right] dV \qquad 7-43$$

وبتطبيق الشروط الابتدائية للنبيطة وهى انعدام تيار المصرف I_D بانعدام جهد المصرف V_D فإن:

$$I_D = -\frac{2\,\sigma\, h\, z}{L} \left[V_D - \frac{2}{3}\, \frac{(V_D - V_G)^{3/2}}{(V_P)^{1/2}} - \frac{2}{3}\, \frac{(V_G)^{3/2}}{(V_P)^{1/2}} \right] \qquad 7-44$$

وعند حالة التشبع تكون:

$$I_D = I_{D(sat)} \quad ، \quad V_{D(Sat)} = V_G - V_P$$

وتصبح علاقة التيار على الهيئة:

$$I_{D(sat)} = -\frac{2\,\sigma\,h\,z}{L}\left[V_G\left\{1 - \frac{2}{3}\left(\frac{V_G}{V_P}\right)^{1/2}\right\} - \frac{V_P}{3}\right] \qquad 7-45$$

ويلاحظ فى هذه العلاقة أن تيار السحب عند التشبع يكون سالبا فى النبيطة JFET ذات القناة n، كما أن الكميات V_G ، V_P تكون أيضا سالبة بينما تكون V_D موجبة.

مثال (٧ ـ ٦):

ترانزيستور JFET ذو قناة n، فيه قمة توصيل القناة $(2a)$ تساوى $2\ \mu m$ وطول القناة $10\ \mu m$ وسمكها $250\ \mu m$ وتركيز الإشابة فيها $N_D = 3 \times 10^{15}\ cm^{-3}$ فإذا كانت حركية الإلكترون $1500\ cm^2/Vs$، ε_{Si} تساوى $11.9 \times 8.85 \times 10^{-14}$، احسب:

(أ) قيمة جهد القطع التحضرى.

(ب) $V_{D(sat)}$ عند $V_G = -1\ V.$

(جـ) $I_{D(sat)}$ عند $V_G = -1\ V.$

الحل:

(أ) بتطبيق العلاقة:

$$V_P = \frac{qN_Da^2}{2\varepsilon_{Si}}$$

$$\therefore V_P = \frac{(1.6 \times 10^{-19})\,(3 \times 10^{15})\,(10^{-4})^2}{(2)\,(8.85 \times 10^{-14})\,(11.9)} = -2.28\ \ V$$

(ب):

$$V_{D(sat)} = V_G - V_P$$

$$= (-1) - (2.28) = 1.28\ \ V.$$

(جـ)

$$I_{D(sat)} = -\frac{2\,\sigma\, h\, z}{L}\left[V_G \left\{ 1 - \frac{2}{3}\left(\frac{V_G}{V_P}\right)^{1/2} \right\} - \frac{V_P}{3} \right]$$

وبالتعويض عن $\sigma = nq\mu_n$

$$I_{D(sat)} = -3.6\times 10^{-3}\left[(-1)\left\{ 1 - \frac{2}{3}\left(\frac{1}{2.28}\right)^{1/2} \right\} - \frac{(-2.28)}{3} \right]$$

$$= -3.6\times 10^{-3}\left[-1 + 0.441 + 0.76 \right] = -\ 724 \quad \mu A.$$

(٩-٧) ملخص الفصل

فى بداية الفصل ناقشنا ثنائي MOS والذى عرف بسعة MOS ودرسنا أثر جهد الانحياز بأحواله الثلاثة - النضوب، الانقلاب، التكدس. وتمكنا من حساب السعة المرتبطة بطبقة الأكسيد كتأسيس الفهم الصحيح لعمل النبيطة MOS . اتجهنا إلى أشكال نطاقات الطاقة فى الأنماط المختلفة وإجراء حسابات سريعة لتعيين قيمة V_{inv} (جهد الانقلاب الحاد) واتساع طبقة النضوب ثم تم اشتقاق عتبة الجهد V_T لنبيطة MOS مثالية. بعد ذلك استخدمنا الثنائى MOS لفهم عمل نبيطة MOSFET والنمط المحسن فيه وتحليل كلى ونوعى للمنحنيات المميزة واستعراض خصائص نمط النضوب للنبيطة. مع الإشارة للفرق بين نمطى النضوب والنمط المحسن. ففى الأول تكون النبيطة فى حالة وضع التشغيل On بينما فى حالة النمط المحسن فى الحالة المعتادة يكون الترانزيستور فى حالة توقف Off. استعرضنا بعد ذلك المشاكل المتعلقة بتصغير أبعاد النبيطة. وفى النهاية تناولنا نبيطة JFET والتى تعتبر نوعا للترانزيستور نمطى التحكم الانسياقى أحادى القطب، ويتميز بأدائه الفائق.

أسئلة الفصل

١ ـ نبيطة JEFT ذات قناة n من السيليكون، فيها الإشابة p^+ تكافئ 10^{18} cm^{-3} ذرة وإشابة القناة n 10^{17} cm^{-3} ، سمك القناة $0.25\ \mu m$. احسب قيمة الجهد المبيت وكذلك الانحيار اللازم لإحداث القطع التخصرى فى القناة عند 300K.

٢ ـ نبيطة MOSFET مقواه من Ga As (وهى نبيطة من فلز وشبه موصل) تتميز بما يلى:

الجهد المبيت	0.76 V
إشابة القناة	10^{17} cm^{-3}
سمك القناة	$0.06\ \mu m$

احسب انحيار البوابة اللازم لفتح النبيطة.

٣ ـ فى المسألة السابقة، احسب أقصى طول لقناة النبيطة المقواة.

٤ ـ نبيطة MOSFET مثالية ذات قناة p، فيها:

سمك القناة	$z = 25\ \mu m$
تحركية القناة	$\mu_p = 250$ cm^2 / V.s
طول القناة	$L = 1.0\ \mu m$
سمك طبقة الأكسيد	$d_{ox} = 500$ Å
جهد العتبة	$V_T = 0.8$ V.

احسب وارسم تغير قيمة I_D مع V_D عند $-0.5 \leq V_D \leq 0$ عند انحيار بوابة بالقيم $V_G = 0, -1, -2. -3$ V.

٥ ـ نبيطة n – MOSFET، فيها النسبة بين سمك القناة إلى طولها (z/L) يساوى 15، جهد العتبة 0.5 V وحركية الإلكترون 500 cm^2/ Vs وسمك طبقة الأكسيد 700 Å احسب تيار المصرف وقيمة المقاومة الممتدة.

الفصل الثامن

الإلكترونيات البصرية

OPTOELECTRONICS

مقدمة

برز التفاعل بين الفوتونات الضوئية وأشباه الموصلات كحقيقة علمية فتحت آفاقا رحبة أمام علم الفيزياء عامة وأشباه الموصلات بشكل خاص. وأخذت أهمية الفوتونات تتعاظم على حساب كل من الإلكترونات والشغرات لما لديها من خصائص تجعلها قادرة على أن تحل محل ناقلات الشحنة التقليدية. فالأجزاء المختلفة للدارات الكهربية تتصل ببعضها عن طريق مسالك وممرات وطبقات عديدة فلزية وسبائك أو موصل سيليكونى. هذه الوصلات البينية تحمل الجهود والإشارات الكهربية من مصادرها الخارجية إلى الرقاقة وبالعكس، من الرقاقة إلى الوسط الخارجى على سنادات ربط تتصل عند أطرافها بأرجل معدنية مثبتة فى السطح الخلفى للرقاقة. إذا مر تيار كهربى عالى الكثافة من إلكترونات أو شغرات فى هذه الوصلات البينية فإنه يدمرها. السبب فى ذلك هو كبر كمية الحركة لهذه الحاملات، فعند السرعات الكبيرة لها يحدث انتقال لكميات الحركة إلى الشبيكة البلّورية للوصلات البينية فتدمرها أو تتسبب فى دوائر مقصرة بين مسالك متجاورة. على النقيض من ذلك تتميز الفوتونات بكميات حركة ضئيلة فإذا حلت كثافة عالية من الفوتونات تتحرك فى دليل موجى محل الكثافة العالية من حاملات الشحنة أمكن تجنب هذه المشاكل فى الدارات الكهربية.

إضافة إلى ذلك حين يمر تيار كهربى عالى التردد من الإلكترونات أو الشغرات، تُشع طاقة تتناسب مع الأس الرابع للتردد. وتنشأ بذلك مشاكل عديدة من التقاط الطاقة المشعة بكافة الوصلات البينية المجاورة وتداخل المعلومات وحدوث التشويش.

ويمكن التغلب على مثل هذه المشاكل باستخدام تيار فوتونى بتردداته العالية، يمر فى أدلة أو موجهات موجية، تصنّع بحيث تختزل التشويش بكفاءة عالية، ويكون بذلك اللغط الضوئى أقل بكثير من نظيره الكهربى.

يعرف فرع العلوم المبنى على تفاعل الفوتونات البصرية مع أشباه الموصلات «بالإلكترونيات البصرية»، وأهم تطبيقاته هى :

١- الذاكرة، حيث تختزن المعلومات رقميا على أقراص بصرية مدمجة ويمكن قراءتها باستخدام ليزر الحالة الجامدة. وقد أحدثت هذه التقنية ثورة فى طرق تسجيل الأصوات والموسيقى والمعلومات.

٢- الاتصالات البصرية، وقد أدت إلى دفع مجالات البحوث فى فيزياء أشباه الموصلات وتطويرها.

٣- الشبكات المحلية باتصال عـدد من الحاسبـات والتليفونات ببـعضهـا البعض اتصالا بصريا وتقوم بتبادل المعلومات المختلفة.

٤- النشر والطباعة بالاستعانة بالطابعة الليزرية.

٥- عمليات التـوجيه والتحكم فى مـجال أسلحة الليزر الموجـهة، والتحكم فى الطائرات التى تطير بدون طيار.

وهكذا أصبح شـائعا اسـتخدام الفـوتونات بدلا من الإلكترونـات فى الوصلات البينية للرقـائق الإلكترونية، وفى دارات القطع والوصل وما إلى ذلك. وتـنقسم نبيطات الإلكترونيات البصرية إلى :

أ - نبـيطات تحول التـيار الكهـربى إلى ضوء، منهـا الثنائى الباعث للـضوء (LED) والثنائى الليزر (LD).

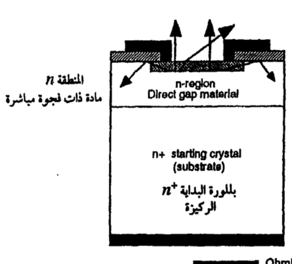
ب- نبيطات تحول النبضـات الضوئية إلى تيار كهربى، منها كـاشفات الضوء والخلايا الضوئية.

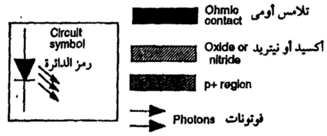
وفيما يلى سوف نستعرض بالتفصيل هذه النبيطات المختلفة.

(٨-١) الثنائى الباعث للضوء The Light Emitting Diode (LED)

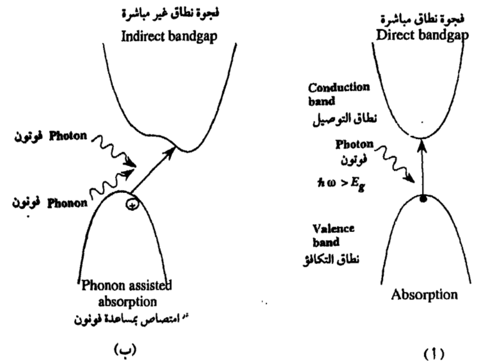
يبين شكل (٨-١) تخطيطا لتركيب الثنائى المشع للضـوء مع الرمز الكهربى المميز له. تصنع هذه النبيطة من شبه موصل فيه فجوة الطاقة ذو انتقال مباشر، للحصول على كفـاءة إشعـاع فوتونى مناسب، إلا أنه يمكن لمثـل هذه النبيطة أن تعـمل بكفاءة إشـعاع منخفض إذا صُنعت من شـبه موصل يضم فجـوة طـاقة ذا انتقـال غير مـباشـر، شكل (٨-٢).

تكمن آليـة انبعاث الفـوتونات من هذه النبيطة فـيمـا يعرف بالضيـائية الكهـربية بالحقن. ولإتمام هذه العـملية يتطلب الأمر ضخ قـدر وفير من الإلكتـرونات فى منطقة تعج بوفـرة من الشغـرات (أو العكس) فـيحـدث العديد من إعـادة الالتئـام بين نوعى الشحنتين وتنبعث نتـيجة لذلك فوتونات. ويبين شكل (٨-٣أ) ما يحـدث حول منطقة وصلة الثنائى، وفـيه نلاحظ أنه نتـيجـة لتفـوق طول الانتشار لـلإلكترون عمـا هو فى الشاغرة، تكون رقعة انبعاث الفوتونات ناحية p من الوصلة أكبر مما هى عليه ناحية n، وقد وجد أنه عند تصنيع النبيطة LED يكون من الأفضل الحصول على التـركيبة $n^{++}p$ حيث يعـمل التلامس مع n^{++} على حـقن قدر وافـر من الإلكترونات نحـو الرقعـة p





شكل (٨-١) التركيب الأساسى للثنائى الباعث للضوء LED



شكل (٨-٢) فجوة الطاقة فى حالتى الانتقال المباشر بامتصاص فوتون (أ)، والانتقال غير المباشر بامتصاص فوتون وفونون، وذلك عند انتقال إلكترون من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل (ب.)

ليحدث فيها إعادة الالتئام، كما يعمل طول الإنتشار للإلكترون على زيادة حجم منطقة الانبعاث على الجانب p من الوصلة، وهذه صورة مبسطة للغاية لتركيب نبيطة LED.

فى شكل (٨-٣ب) نماذج لشكلها بعد التصنيع. وتطبيقاتها، شكل (٨-٣جـ) وفى الواقع يلزم الأخذ فى الاعتبار كفاءة انبعاث الفوتون فى نوعى شبه الموصل n ، p، إلا أنه صار معتادا أن يكون هناك فى الغالب حجم انبعاث فوتونى فى ناحية واحدة من الوصلة، وينطبق ذلك على نبيطات الليزر أيضا.

مثال ٨-١ :

نقل إلكترون من قمة نطاق التكافؤ إلى قاع نطاق التوصيل فى السيليكون بامتصاص فوتون. احسب التغير فى كمية حركة الإلكترون. وهل يمكن للفوتون أن يمد بهذا الفرق فى كمية الحركة؟

الحل :

تقع النهاية الصغرى لنطاق التوصيل فى السيليكون عند الإحداثيات $(0.85, 0, 0)$ $k = \frac{2\pi}{a}$. وتقع قمة نطاق التكافؤ عند $k = 0$، بذلك يكون التغير فى كمية الحركة :

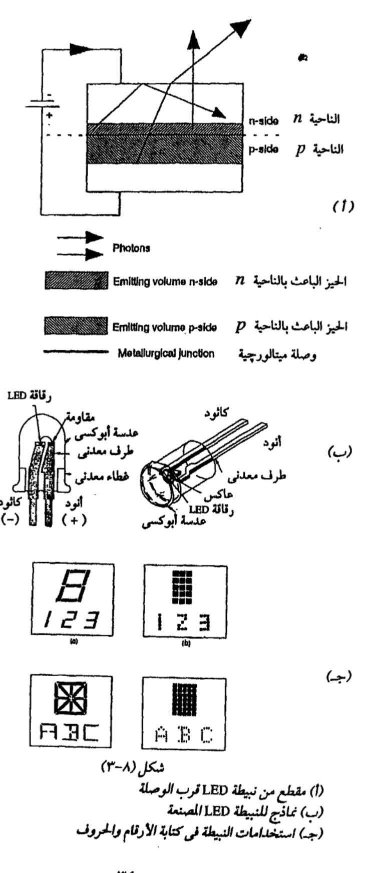
$$\begin{aligned} \Delta P &= \hbar \Delta k = \hbar \frac{2\pi}{a} (0.85) \\ &= (1.05 \times 10^{-34}) \left(\frac{2\pi}{5.43 \times 10^{-10}} \right) \\ &= 1.03 \times 10^{-24} \text{ kg ms}^{-1} \end{aligned}$$

والفوتون الذى له طاقة مساوية لفجوة طاقة السيليكون يمكن أن يمد بكمية حركة قدرها :

$$\hbar k_{ph} = \hbar \frac{2\pi}{\lambda}$$

وبالنسبة لفجوة طاقة السيليكون $\lambda = 1.06\ \mu m$:

$$\therefore \quad \hbar k_{ph} = \frac{1.05 \times 10^{-34} \times 2\pi}{1.06 \times 10^{-6}} \approx 6 \times 10^{-28} \text{ kg ms}^{-1}$$



شكل (٨-٣)

(أ) مقطع من نبيطة LED قرب الوصلة

(ب) نماذج للنبيطة LED المصنعة

(جـ) استخدامات النبيطة فى كتابة الأرقام والحروف

وهى كمية تحـرك صغيرة جدا لا تحدث التغيـر الحادث، ويلزم لذلك قدر إضافى من كمية تحرك ذبذبة الشبيكة لحدوث الانتقـال، وهذا هو ما يعرف بالانتقال غير المباشر فى فجوة الطاقة.

(٨-٢) المواد اللازمة لتصنيع الثنائى الباعث للضوء

Materials for Light Emitting Devices

تحدد فجوة الطاقة فى أشباه الموصلات المستخدمة فى هذه النبيطات، طاقة الفوتون المنبعث منها. فـإذا أريد تصنيع نبيطة LED تبعث بفوتونات فى مـدى يمتد من الأشعة تحت الحمراء إلى الأشعة فوق البنفسـجية من الطيف الكهرومغناطيسى، لزم البحث عن مواد مـختلفة. إلا أنه ليـست هناك الآن منظومة أحادية يمكنـها أن تغطى هذا المدى من الطاقة على الرغم من أن نيتريدات المجموعتين الثالثة والخامسة تقرب من ذلك.

كمـا أن أغلب ما يستـعمل بكثـرة فى المجموعـتين الثانيـة والسادسة من أشـباه الموصلات ذات الانتـقال المباشر مثـل المركبات Zn Te، Zn Se وغيرهمـا تكون تلقائيا مشابة بأى من نوعى الإشابة *p* أو *n* ولا تقبل أن يعكس نوعهـا بزيادة الإشابة لأسباب معـقدة ورغم ذلك أمكن تصنيع نبـيطات تبعث بالضـوء الأزرق وأخرى تبعـث بالليزر بصعوبة بالغة باستـخدام مركبات من المجموعتين الثانية والسـادسة، وأيضا من نيتريدات المجموعتين الثالثة والخامسة وسبائكهما مثل،

In N , GaN , Al N , In Ga N , Al Ga N , In Al Ga N

وتبقى فـجوة الطاقة ذات انتقـال مباشر لأى تركيـز فى مركبات هذه النـيتريدات وتساوى 2 eV فى المركب In N ، 3.3 eV فى المركب Ga N أمـا المركب In Ga N فيمكنه تغطية معظم ألوان الطيف المرئى.

مثال ٨-٢ :

ما مدى الأطوال الموجبة للفوتونات المنبعثة من نبيطة باعثة للضوء مصنعة من شبه الموصل In Ga N. وما الألوان الصادرة منها ؟

الحل :

إذا فرض أن هناك تركيزا واحدا من مركب شبه الموصل المستخدم فى النبيطة على النحو التالى :

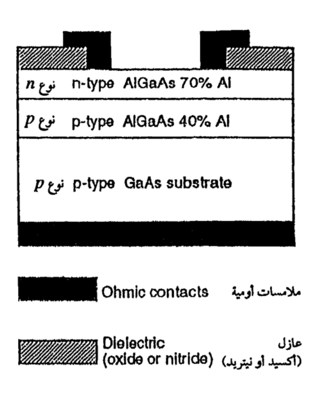
10% Ga, 40% In, 50% N

فإن هذه المنظومة سوف تبعث بضوء أحادى الموجة.

أما إذا تخيلنا النبيطة وقد صنعت من طبقات متدرجة بحيث تتغير المادة رويدا رويدا من Ga N إلى In N فى أى ناحية من الوصلة فى سبيكة In Ga N، بات على الحاملات الأقلية المحقونة أن تجتاز كل هذه الطبقات كى يتسنى إنتاج فوتونات تغطى كافة الأطوال الموجية فى الضوء المرئى بكفاءة. فتنبعث ناحية أقصر طول موجى والمناظر لأكبر فجوة طاقة ومقدارها 3.3 eV للمركب Ga N، فوتونات طولها الموجى 376 nm وتقع فى منطقة الأشعة فوق البنفسجية. أما فى ناحية المركب In N ذات فجوة الطاقة 2 eV فتنبعث فوتونات بطول موجى 620 µm للون البرتقالى. لحساب هذه الأطوال تستخدم العلاقة المعروفة بين الطاقة (E) بوحدات eV وطول الموجة λ بالميكرون، وهى:

$$E\ [\mathrm{eV}] = \frac{1.24}{\lambda\ [\mu\mathrm{m}]}$$

نستنتج مما سبق أن تصنيع النبيطة LED يكون من أشباه الموصلات ذات فجوة الطاقة المباشرة، إلا أنه يصعب تحقيق ذلك على المستوى التجارى. ولمعرفة المواد التى يمكن الحصول عليها لتصنيع النبيطة LED بصورة واقعية نبدأ بتلك التى تبعث بفوتوناتها فى المنطقة تحت الحمراء والتى تتميز بكبر الطول الموجى وهى منظومة Al Ga As/Ga As، ففيها يمكن إشابة أى من النوعين p، n. وتبقى فجوة الطاقة فى شبه الموصل Al Ga As ذى انتقال مباشر حتى درجة معينة من تركيز الألومنيوم Al وهو بذلك يكون باعثا جيدا للفوتونات. فإذا علمنا أن قيمة فجوة الطاقة فى مركب Ga As تساوى 1.43 eV عند درجة حرارة الغرفة، كان الطول الموجى للفوتونات المنبعثة فى حدود 880 µm. عند زيادة نسبة الألومنيوم فى السبيكة $Ga_{1-x}Al_xAs$ تزداد فجوة الطاقة فى شبه الموصل وتتحول من الانتقال المباشر إلى الانتقال غير المباشر عند $x = 0.44$ وتصبح قيمتها 1.82 eV فتبعث عندئذ بفوتون طوله الموجى 633 nm فى مدى اللون الأحمر من الطيف المرئى. يتضح مما تقدم أن منظومة Al Ga As يمكن استخدامها لتصنيع ثنائى باعث للضوء LED يغطى أطوال موجية فى المدى من 633 nm – 880 nm أى من المنطقة تحت الحمراء القريبة وحتى المنطقة الحمراء. ويبين شكل (٨-٤) اختلافا فى تركيز المركب Al Ga As ناحيتى p، n من الوصلة، وتعرف بالوصلة غير المتجانسة. ويؤدى هذا الاختلاف البسيط إلى كفاءة انبعاث عالية وظهور ضوء أحمر ساطع للنبيطة LED. فالطبقة p- Al Ga As تحتوى على 40% من وزنها ألومنيوم؛ ولذا فإنها تتميز بانتقال مباشر لفجوة الطاقة. هذه الطبقة هى الباعثة للضوء، وتنتج فوتونات فى المدى 650 nm.



شكل (٨-٤) نبيطة LED حمراء من (Al Ga As / Ga As)

وتمثل طبقة النوع n- Al Ga As، النصف الثانى من الوصلة ويبلغ تركيز الألومنيوم فيها 70% وفيها فجوة الطاقة غير مباشـرة وتزداد قيمتها عما هى فى طبقة النوع *p*، وهذا ما يجعلها ذات كفاءة عاليـة للحقن بالإلكترونات إلى الطبقة *p*. وتفضل حاملات الشحنة أن تسـتوطن المواد ذات فـجوة الطاقـة الأصغـر، وبذلك تلازم الإلكتـرونات الطبقـة *p* وتتخمها فتزداد بذلك عملية إعادة الالتـئام، ومن ثم تزداد كفاءة النبيطة، كما يؤدى كبر فجوة الطاقة في الطـبقة العليا *n* إلى جعلها طبـقة نافذة لأى فوتونات سـاقطة عليها؛ ولذلك فهى تنفذ الفوتونات المنبعثة من الطبقة التحتية *p* بسهولة خلالها.

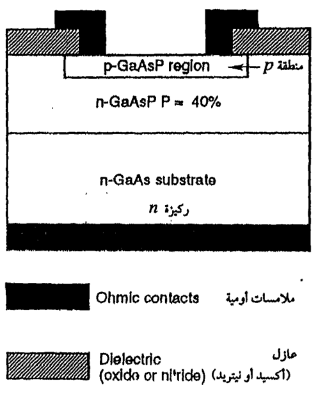
هذه العناصر جـميعـها جعلت من الثنائى البـاعث للضوء (Al Ga As/Ga As) مصدرا ذا كفاءة انبعاث عالية للضوء الأحمر.

فى مجال الاتصالات باستخدام الألياف البصرية، تدعو الحاجة إلى وجود مصدر فوتونى يبـعث بفوتونات فى مـدى الطول الموجى $1.3\ \mu m$ أو $1.55\ \mu m$ للوصول إلى الحد الأدنى للامتصاص والفقد ومن ثم تحـقيق أقصى قدرة نقل بهذه الألياف. ولتصنيع نبيطة باعثة للضوء LED أو Laser فى هذا المدى من الأطوال الموجية، يستخدم المركب Ga In As P - (جاليوم- إنديـوم - زرنيخ - فوسفور)، ويُنمى فوق ركـيزة من بلُورة

فوسفوريد الإنديوم. بتغيير تركيز الشبيكة يمكن توليد فوتونات تقع أطوالها الموجية بين ($1-2\ \mu m$) وتتاح الآن أشباه موصلات لتصنيع نبيطات LED تبعث بفوتونات ذات أطوال موجية كبيرة للغاية، وعلى سبيل المثال يمكن للمركبات Pb Sn Te ، Pb Sn S أن تبعث بفوتونات تقع أطوالها الموجية فى المدى من $5\ \mu m$ إلى ما يقرب من $50\ \mu m$.

(٨-٣) المواد المستخدمة فى النبيطات LEDS للضوء المرئى
Materials for Visible Wavelength LEDS

يعتبر الثنائى الباعث للضوء المرئى أكثر النبيطات شيوعا فى الوقت الحاضر. ويبعث الألوان الأصفر، والأخضر، والكهرمانى، والنادر منها يبعث باللون الأزرق، وكما جاء من قبل ينبعث اللون الأحمر من نبيطة Ga As P. ويبين شكل (٨-٥) تخطيطا لهذه النبيطة، وتنمى على ركيزة من رقائق بلّورية للمركب Ga As عن طريق تكثيف البخار الكيميائى.

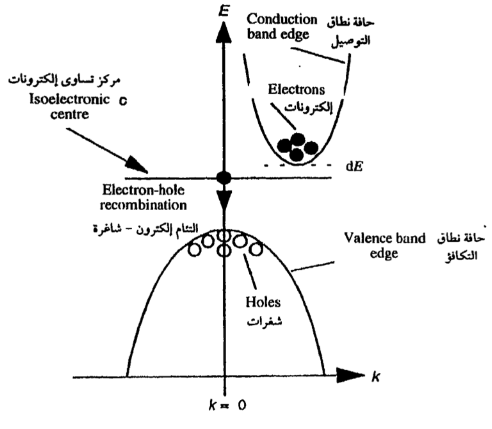


شكل (٨-٥) نبيطة LED حمراء من (Ga As P) فوق ركيزة من Ga As

وجدير بالذكر أن مركب Ga P يمثل شبه موصل غير مباشر، ومع ذلك يمكن استخدامه فى تصنيع نبيطة باعثة للضوء الأحمر، وكذلك الحال مع المركب Ga As P

يمكنه أن يبعث بالألو ن الاصـفر والكهرمـانى والأزرق. ففى حالات خاصـة جدا يمكن إقحام «مركز تسـاوى إلكترونات التكافؤ» بداخل فجوة طاقة ذات انتقال غـير مباشر فى شبه موصل لزيادة الالتئام المؤدى إلى انبعاث المزيد من الفوتونات بكفاءة عالية.

ويعنى مـركز تساوى إلكتـرونات التكافؤ أن المركـز (العنصر) الدخـيل يكون له نفس عـدد إلكترونات التكافـؤ الموجودة فى العنـصر الذى تم استـبداله. فـمثـلا يمكن للنتروچين أن يسـتبدل ببعض الفوسـفور فى المركب Ga P فيصبح النتـروچين متساويا إلكترونيا للفـوسفور وتسلك المنظومة عندئذ سلوكا مـغايرا تماما وتبعث بكفاءة إشـعاعا أزرق. ويبين شكل (٨-٦) تخطيطـا لما يمكن أن يحدث بالتـقـريب. فإذا أمكن تحـديد موقع مركز تساوى إلكـترونات التكافؤ بدقة عالية لكونه موقعـا لنقطـة شبيكية، سوف يكون هناك مـدى ملحوظ فى تقـدير حالة كـميـة الحركـة، طبقـا لقاعـدة عدم الـدقة لهيسنبرج، ويمثل الشكل منحنى تغـير الطاقة مع كمية حركة المركز وفـقا لهذا التصور، وحيث إن عدد إلكتـرونات التكافؤ متساوية فى كل من المـادة المذيبة وهى أحد مكونات شبـه الموصل والمادة المذابة وهى المركز ذاته فإن هذا الإحـلال لا يعتبر إشـابة قد تمنح أو



شكل (٨-٦) مركز تساوى إلكترونات التكافؤ

تكتسب إلكترونا من شـبيكة المذيب، بل يعتبر المركز كمـوطئ للإلكترونات فى مخطط النطاق الإحداثيات $E-k$ لإحداث انتقالات إشعاعية فعالة. وعملية الالتئام المبينة بالشكل لا يصحبـها تغير فى قيـمة العدد الموجى k ومن ثم لا يحدث تغـير فى كميـة الحركة. وتكافئ هذه الحالة ما قد يحدث فى فجوة طاقة ذات انتقال مباشر؛ إلا أن طاقة الفوتون المنبعث تـكون أقل من طاقة فجـوة النطاق لحدوث الانتـقال الفعـال بين مركـز تساوى إلكترونات التكافؤ وحافـة نطاق التكافؤ ويقدّر هذا الفرق dE فى شكل (٨-٦) بحوالى 50 meV فى حالة Ga P N ويفـيد ذلك فـى منع امتـصـاص الفوتون بـواسطة شبـه الموصل، الذى يصبح فى هذه الحـالة نافذا للفوتونات المنطلقة من المـادة كضوء، وبذلك ترتفع كفاءة النبيطة كمصدر للفوتونات.

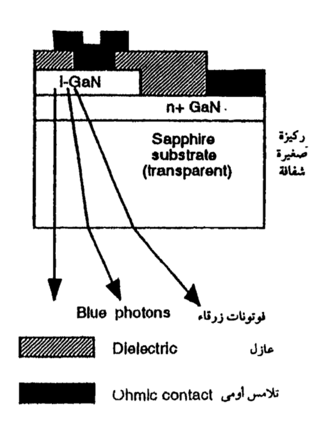
للحصول على ضوء فى منطقة اللون الأحـمر باستخدام GaP، يتم إدخال مركز تساوى إلكترونات التكافؤ يحتوى على كل من Zn، وكذلك O، وقد تستخدم المنظومة GaP : ZnO فى تصمـيم نبيطات تامة الكفـاءة، إلا أنها تولد فـوتونات طولها الموجى 690 nm وتقـع فى منطقـة الحسـاسية الضعيـفة للعين؛ ولذلك يفـضل عليهـا المنظومة AlGaAs / GaAs فى عمل نبيطات تتميز بشدة ضيائية عالية.

ويمكن تجـاريا إنتاج نبـيطات LEDS للضوء الـبرتقالى بطـول موجى 620 nm والضوء الأصفر بطول موجى 520 nm بإقحام النتروچين N كمركز تساوى إلكترونات التكافؤ فى شـبه الموصل Ga As P. كمـا يمكن توليد أطوال موجـية مخـتلفة فى هذه النبيطات بتـغيير تركيـز الفوسفور، وكـذلك بإقحام النتروچين أيضـا فى المنظومة Ga P يمكن تصنيع نبـيطات LEDS للون الأخـضـر. بذلك نصل إلى ناحـيـة الطول الموجى القصير فى مدى الطيف المرئى وهى المنطقة الزرقاء، فتصنع نبيطات LEDS للون الأزرق على المستوى التجارى باستعمال كربيد السيليكون SiC أو نيتريد الجاليوم Ga N. غير أن هاتين المادتين لهما عيوب حادة تجعل هذه النبيطات غير فعالة للأسباب التالية:

- يتميز كربيـد السيليكون بكفاءة منخفضة عند استعـماله كمادة فى ثنائى باعث الضوء، حـيث يمتلك فجوة طـاقة غير مـباشرة ولـيس له ما يناظره كمـركز تساوى إلكترونات التكافؤ.
- الانتقال المؤدى لانبعاث الفـوتون الأزرق يقع بين النطاقات ومراكز الإشابة فى SiC. ويسـتخـدم النتـروچين فى إشـابة النوع n من هذه النبـيطات، بينمـا يستخدم الألومنيوم فى إشابة النوع p منها.

- درجة الصلادة الفائقة للمركب SiC مع درجة حرارة التشغيل المرتفعة تزيد من صعوبة استعماله فى تصنيع النبيطة.

أما بالنسبة لنيتريد الجاليوم Ga N فهو على الرغم من تميزه كشبه موصل ذى فجوة طاقة مباشرة إلا أنه لا يمكن الحصول على النوع p منه، وذلك لنموه بشكل تلقائى على هيئة n^{++} وتصنع النبيطة الخاصة به بتكوين طبقة من الموصل الذاتى Ga N باستعمال إشابة مركزة من الزنك. ويحدث الانبعاث الضوئى إذا تم حقن الإلكترونات من طبقة n^{+} Ga N إلى منطقة شبه الموصل الذاتى المشاب بالزنك Zn، ويبين شكل (٧-٨) نموذجا تقريبيا لهذه النبيطة. ونشير فى هذا السياق إلى أن عمليات إعادة الالتئام التى تؤدى إلى توليد فوتونات قد تشمل مراكز شوائب الزنك. والانبعاث الفوتونى من مثل هذه المراكز يقل فى كفاءته كثيرا عن كفاءة الانبعاث الناتج من عمليات الانتقال بين نطاقات الطاقة. ويمكن ترتيب كفاءة الانبعاث فى أشباه الموصلات على النحو التالى :



شكل (٨-٧) ثنائى باعث الضوء الأزرق

(أ) عمليات الالتئام عند الانتقال من نطاق طاقة إلى آخر وذلك فى أشباه الموصلات ذى فجوة الطاقة المباشرة.

(ب) إعادة الالتئام عن طريق مراكز تساوى إلكترونات التكافؤ.

(جـ) إعادة الالتئام عن طريق الشوائب فى مراكز تساوى إلكترونات التكافؤ.

(د) إعادة الالتئام عن طريق الانتقال من نطاق طاقة إلى آخر فى أشباه الموصلات ذى فجوة الطاقة غير المباشرة.

ويتضح مما تقدم أنه يمكن عمل نبيطات ذات كفاءة منخفضة للون الأزرق بشكل تجارى، أما إذا أمكن الحصول على أي من النوع p من شبه الموصل Ga N أو مركز تساوى إلكترونات التكافؤ لمركب كربيد الكالسيوم Si C فإنه يمكن الحصول على نبيطات LEDS تبعث باللون الأزرق الساطع.

مثال ٨-٣ :

يبين الجدول التالى (٨-١) بيانات تخص نبيطة LED

جدول (٨-١)

الضوء المنبعث Light	التيار الأمامى I_F (mA)	الجهد الأمامى V_F (V.)	طول الموجة λ (nm)
Red	10	2	635
Green	10	2	662
Yellow	10	2	585

حيث تمثل V_F جهد الانحيار الأمامى، I_F التيار الأمامى فى النبيطة. فإذا كان تركيب الثنائى $n^{++}p$ والتيار المار معظمه من الإلكترونات. احسب لكل نبيطة بالجدول ما يلى :

(أ) طاقة فجوة النطاق لشبه الموصل.

(ب) القدرة الضيائية المنبعثة فى النبيطة بفرض أن كفاءة انبعاث الفوتونات 30%.

(جـ) الطاقة الداخلية للثنائى.

(د) النسبة الكلية بين الكفاءة الكهربية إلى الكفاءة الضيائية.

الحل :

(أ) بتطبيق المعادلة :

$$E = \frac{1.24}{\lambda}$$

حيث E طاقة فجوة النطاق بوحدات .eV، λ الطول الموجى بوحدات μm، نحصل على:

$$E\,(\text{Red}) = 1.953\ \text{eV}$$

$$E\,(\text{Green}) = 2.206\ \text{eV}$$

$$E\,(\text{Yello}) = 2.120\ \text{eV}$$

(ب) من تعريف التيار بأنه معدل الشحنات المتدفقة Q فى وحدة الزمن t :

$$\therefore \quad I = \frac{Q}{t} = \frac{nq}{t} = 10 \times 10^{-3}\ \text{A}$$

حيث q تمثل شحنة الإلكترون، n عددها. بذلك يصبح عدد الإلكترونات n المارة فى وحدة الزمن :

$$n = \frac{10^{-2}}{q}$$

وتصبح القدرة الضيائية P_0 :

= نسبة الكفاءة × عدد الإلكترونات فى الثانية × طاقة الفوتون

$$\therefore \quad P_0 = (0.3)\ \left(\frac{10^{-2}}{q}\right)\ (h\upsilon)$$

بالتعويض عن المقدار $\left(\frac{h\upsilon}{q}\right)$ بقيمة فجوة الطاقة لشبه الموصل نحصل على القدرات الضيائية للنبيطات على النحو التالى :

P_o (Red) $=$ 5.86 mW

P_o (Green) $=$ 6.62 mW

P_o (Yellow) $=$ 6.36 mW

(جـ) تعطى القدرة الكهربية للنبيطات من العلاقة $P_E = I_F V_F$:

$\therefore$ P_E (Red) $=$ 20 mW

P_E (Green) $=$ 20 mW

P_E (Yellow) $=$ 21 mW

(د) النسبة الكلية (X) للكفاءة الضيائية إلى الكفاءة الكهربية للنبيطات تصبح :

$$X \text{(Red)} = \frac{5.86}{20} = 29.30\%$$

$$X \text{(Green)} = \frac{6.62}{20} = 33.10\%$$

$$X \text{(Yellow)} = \frac{6.36}{21} = 30.30\%$$

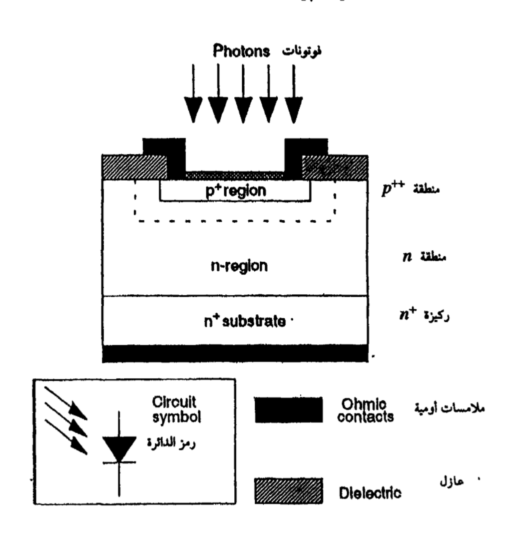
(٨-٤) الكواشف الضوئية الوصلية Junction Photodetectors

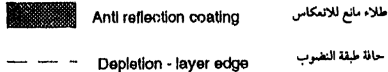
قد يكون ثمة تماثل بين الموصلات الضوئية الوصلية والكواشف الضوئية الوصلية. فالموصلات تنتج الفوتـونات عند التأثير عليها بجهد انحـياز أمامى على الوصلة *pn* بين شبـهى موصل. أمـا فى الكواشف، فيمكن الكـشف عن فوتون بتطبيـق جهد انحـياز عكسى على الوصلة. ويجب عند اختيار مادة الكاشف أن تكون ذات فجوة طاقة مناسبة تماما لعملية الكشف ودون حاجة إلى شبه موصل مباشر.

يبين شكل (٨-٨) تخطيطا مبسطا لكاشف ضوئى وصلى مع الرمز الكهربى المميز له. ومثل هذه النبـيطة تصنع باستخدام تقنيـة السيليكون، وفيها تسـقط الفوتونات على سطح النبـيطة فإن كـانت طاقاتهـا كافـية، ولّدت أزواجا من الإلـكترونات والشـغرات ولتجنب انعكاس الضـوء، يطلى سطح النبيطة بطبـقة رقيقـة أحادية أو مركبـة من مادة

عازلة كـهربيـا ومانعـة للانعكاس. وبالاختـيار المناسـب لسمك الطبـقة يمكن اخـتزال الانعكاس عند قيمة معينة من الطول الموجى λ للضوء الساقط. فإذا كانت E تمثل قيمة فجوة شبه الموصل فى النبيطة فإن:

$$E\ [\text{eV}] = \frac{1.24}{\lambda\ [\mu\text{m}]}$$





شكل (٨-٨) كاشف ضوئى سيليكونى والرمز المميز له

وباستخدام هذه المعادلة يمكن حساب قيمة طول موجة القطع التى تميز أشباه الموصلات المختلفة كما يعرضها الجدول (٨-٢) التالى:

جدول (٨-٢) طول موجة القطع فى عدد من أشباه الموصلات

شبه الموصل		فجوة الطاقة E (eV)	طول موجة القطع λ (μm)
السيليكون	Si	1.1	1.13
الچيرمانيوم	Ge	0.67	1.85
زرنخيد الجاليوم	Ga As	1.43	0.87
فوسفوريد الجاليوم	Ga P	2.26	0.55

ويوضح الجدول أن السيليكون يمكنه الكشف عن فوتونات ذات أطوال موجية تكاد تقع فى منطقة الأشعة تحت الحمراء، وبذلك يعتبر كاشفا جيدا لهذه الموجات القصيرة نوعا ما. ويبين شكل (٨-٩) مخططا لنطاقى الطاقة لوصلة *pn* فى السيليكون تحت تأثير انحياز عكسى وتولد أزواجا من الإلكترونات والشغرات نتيجة لسقوط فوتونات على السطح العلوى للنبيطة. أحد هذه الأزواج داخل طبقة النضوب واثنان خارجها عند الأطراف المتعادلة. ويلاحظ مدى كفاءة الانفصال بين الشحنات بالنسبة لزوج حاملات الشحنة على منحدر الطاقة داخل طبقة النضوب وذلك بفعل المجال الكهربى القوى والكافى لأن يفصل بين الشحنات عند تشبع سرعة الانسياق. تصل الشحنات إلى الوصلات الأومية الطرفية ويمر التيار فى دائرة خارجية. وقد يمر التيار أيضا إذا تولدت أزواج الإلكترون والشغرات فى مدى طول الانتشار فى المنطقة المتعادلة قرب حافتى طبقة النضوب، وبذلك تنتشر الشحنات نحو حافة طبقة النضوب وتعبرها سريعا إلى الدائرة الخارجية.

وتعتمد عملية امتصاص الضوء فى أشباه الموصلات على الأطوال الموجية كما أنها تخضع للعلاقة الأسية التالية:

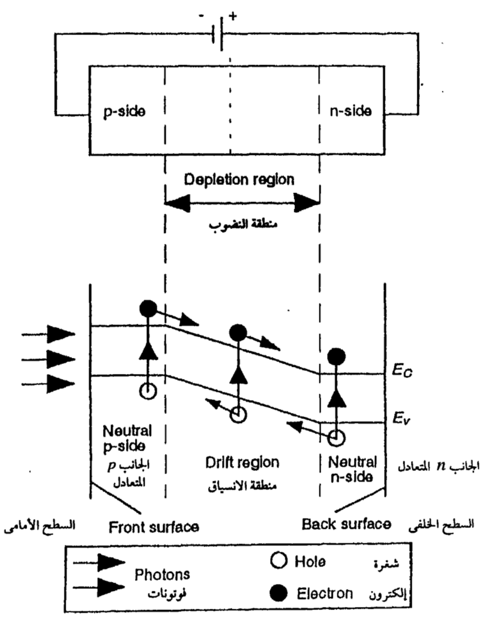
$$I = I_0 \exp(-\alpha \cdot x)$$

حيث تمثل .

I_0 شدة الفوتونات الساقطة بوحدات وات/ متر مربع

I شدة الفوتونات عند عمق x (متر) داخل السيليكون.

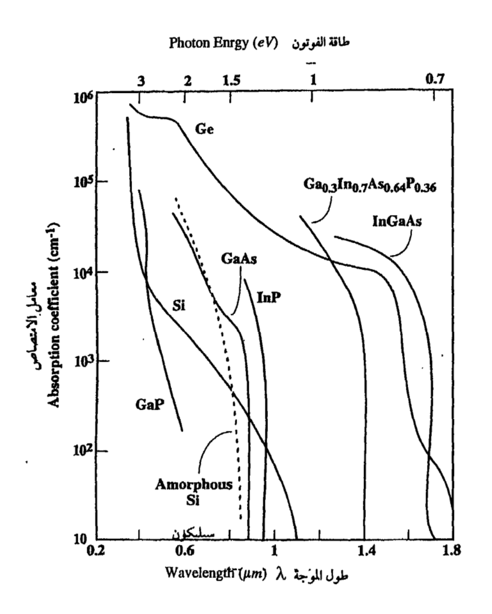
α معامل الامتصاص لكل وحدة طول.



شكل (٨-٩) كاشف ضوئى سيليكونى والرمز المميز له

وتتعاظم قيمة معامل الامتصاص كلما قصرت الأطوال الموجية، شكل (٨-١٠) الذى سبق ذكره فى الفصل الثالث؛ ولذلك لا تنفذ الفوتونات شديدة القصر كثيرا إلى داخل السيليكون لتمام امتصاصها قرب السطح، كما أن الأزواج المتولدة عنها يعاد التئامها قبل الاقتراب من منطقة النضوب فلا يحدث انفصال بين الشحنات. وهكذا تعجز الوصلة المدفونة فى شكل (٨-٩) عن كشف أمثال هذه الفوتونات.

وهكذا نجد أنه للكشف عن فوتونات الموجات القصيرة يلزم أن تقترب الوصلة من



شكل (٨-١٠) العلاقة بين معامل الامتصاص وطول موجة (طاقة) الفوتونات الساقطة لعدد من أشباه الموصلات

سطح السيليكون ويتحقق ذلك باللجوء إلى ثنائى يتألف من فلز وسبه موصل، يعرف بثنائى شوتكى وفيه تعمل طبقة الفلز الرقيقة كوصلة تقويم مع سطح شبه الموصل. وللحصول على كاشف ضوئى جيد، علينا أن نوسع منطقة النضوب لامتصاص أكبر قدر ممكن من الفوتونات الساقطة، ولتحقيق ذلك يلزم تطبيق جهد انحياز عكسى كبير مع تقليل إشابة أحد جانبى الوصلة. أما إذا تطلب الأمر تصنيع كاشف سريع، لزم الإقلال من عمليات الانتشار البطيئة، ويتحقق ذلك بترقيق جزء السيليكون الذى يعلو الوصلة مع زيادة درجة إشابته، بذلك نتجنب امتصاص الفوتونات فى المنطقة المتعادلة، وقد يؤدى هذا إلى تباطؤ عملية انتشار حاملات الشحنة، إلا أن زيادة درجة إشابة القمة يجعل ما تحت الوصلة عند درجة إشابة منخفضة نسبيا فتزداد بذلك رقعة النضوب وتقل معه سعة الوصلة بما يتيح للنبيطة أن تعمل بطريقة أسرع.

وكذلك يمكن تحسين طبقة النضوب باستعمال ثنائى ضوئى *p-i-n* حيث ترمز (*i*) إلى منطقة شبه موصل ذاتى، مشابة بإشابة خفيفة، شكل (٨-١١). فى هذه النبيطة تضمن المناطق p^+، n^+ مع وجود الانحياز العكسى، نضوب الرقعة *i* بشكل دائم، كما أن الانحياز العكسى الذى يظهر عبرها يولد مجالا كهربيا عاليا يحقق سرعة مسح حاملات الشحنة لمنطقة النضوب.

كان ذلك استعراضا لطرق الكشف عن فوتونات تقل أطوال موجاتها عن طول موجة القطع فى شبه موصل السيليكون وإذا زادت أطوال الموجات عن طول موجة القطع، لا يحدث تولد أزواج حاملات الشحنة ويصبح السيليكون عندئذ نافذا لهذه الفوتونات وخاصة إذا أهمل الامتصاص بواسطة الشوائب والعيوب البلّورية.

مثال ٨-٤ :

كيف يمكن تصميم كاشف ثنائى ضوئى سريع من السيليكون للكشف عن فوتونات صادرة من ليزر هيليوم - نيون لطول موجته 632.8 nm وتردده المعدل 6 GHz علما بأن سمك طبقة النضوب الملائمة لهذا التطبيق هو ما يتيح زمن عبور يكافئ نصف التردد المعدل، كما أن الشحنات تتحرك عند تشبع سرعة الانسياق وقدرها 10^7 cm/s.

الحل :

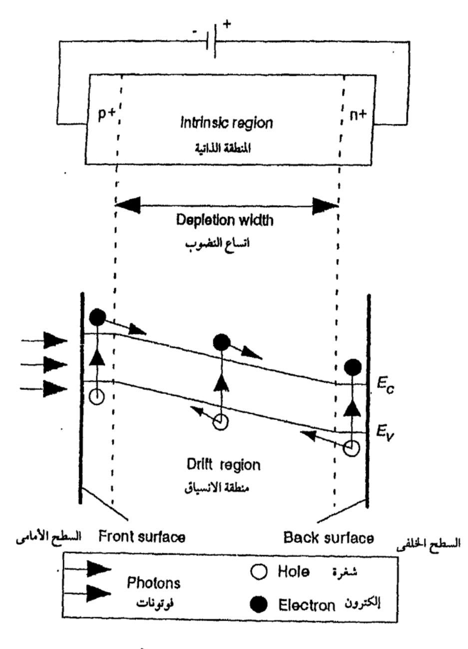
$$\tau \text{ (زمن العبور)} = \frac{2}{f} \quad \text{(مقلوب نصف التردد المعدل)}$$

$$= \frac{1}{3 \times 10^6} = 3.33 \times 10^{-6} \text{ s.}$$

$\therefore$ (زمن العبور) τ × (سرعة التحرك) v = (سمك طبقة النضوب) W

$$= 10^{7} \times 3.33 \times 10^{-6}$$

$$= 33.3\ \mu m.$$



شكل (٨-١١) كاشف ضوئى *p.i.n*

مثال ٨-٥ :

معـامل الامـتصـاص بلقرب من حـو ف النطاق فى كل من Ga As ، Si هو $10^4\ cm^{-1}$ ، $10^3\ cm^{-1}$ على التـرتيب. ما هو أقل سمـك لعينات من شبـهى الموصل لتحقيق امتصاص قدره 90% من الضوء الساقط.

الحل :

الطاقة الممتصة فى عينة طولها L

$$\frac{I}{I_o} = \frac{I_{abs}}{I_{inc}} = 1 - \exp(-\alpha L)$$

$$\therefore \quad L = \frac{1}{\alpha} \ln\left(1 - \frac{I}{I_o}\right)$$

بالتعويض عن $\frac{I}{I_o} = 0.9$

$$\therefore \quad L\,(\text{Ga As}) = \frac{1}{10^4} \ln 0.1 = 2.3 \times 10^{-4}\ \text{cm}$$

$$= 2.3\ \mu\text{m}$$

$$L\,(\text{Si}) = \frac{1}{10^3} \ln 0.1 = 23\ \mu\text{m}$$

يوضح هذا المثال أن الكـاشف الضوئى المبنى على السيلـيكون يحتاج إلى طبـقة امتصاص فعالة سميكة جدا بالمقارنة بالكاشف المبنى على Ga As.

مثال ٨-٦ :

فى المثال السـابق إذا كانت الضيائيـة الساقطة $10\ W/cm^2$ عند $\lambda = 0.75\ \mu m$. احسب معدل تولد أزواج الإلكترون والشغرة فى شبه موصل Ga As.

الحل :

يحسب معدل تولد أزواج الإلكترون والشغرة من العلاقة :

$$G_L = \frac{\alpha P_{op}}{h\upsilon} = \frac{(10^3\ cm^{-1})\ (10\ W/cm^2)}{(1.65)(1.6 \times 10^{-19}\ J)}$$

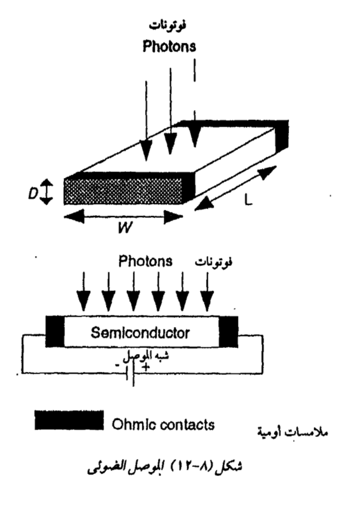
$$= 2.65 \times 10^{23}\ cm^{-3}\ s^{-1}$$

(٨-٥) الموصل الضوئى Photo Conductor

تتكون هذه النبيطة من شريحة رقيقة لبلّورة شبه موصل. ينتهى كلا طرفيها بوصلة أومية، وتزداد الموصلية الكهربية لها عند التأثير عليها بالضوء. لهذه الظاهرة عديد من التطبيقات منها كاميرات التليفزيون وكاشفات الأشعة دون الحمراء وأجهزة قياس شدة الضوء وأجهزة التصوير الضوئى.

يبين شكل (٨-١٢) تخطيطا لخلية كهروضوئية أولية، ويظهر فيها D سمك الخلية كافيا لامتصاص كل الفوتونات الساقطة، بذلك تكون D أكبر قليلا من $\frac{1}{\alpha}$، حيث α معامل امتصاص الضوء. وقد تكون مادة كاشف الضوء فى النبيطة من شبه موصل ذاتى أو شبه موصل عرضى. يؤدى ذلك إلى نوعين من آليات التوصيل الضوئى كما يوضحه شكل (٨-١٣)، هما:

(أ) التوصيل الضوئى الذاتى، شكل (٨-١٣ أ) وفيه يلزم أن تكون طاقة الفوتون الساقط أكبر من فجوة طاقة شبه الموصل كى يتولد زوج من



شكل (٨-١٢) الموصل الضوئى

إلكترود وشعرة وينحرك هذا الروج تحت تأثير مجال كهربى إلى الوصلات الأومية الطرفية فتولد تيارا كهربيا فى الدائرة الخارجية.

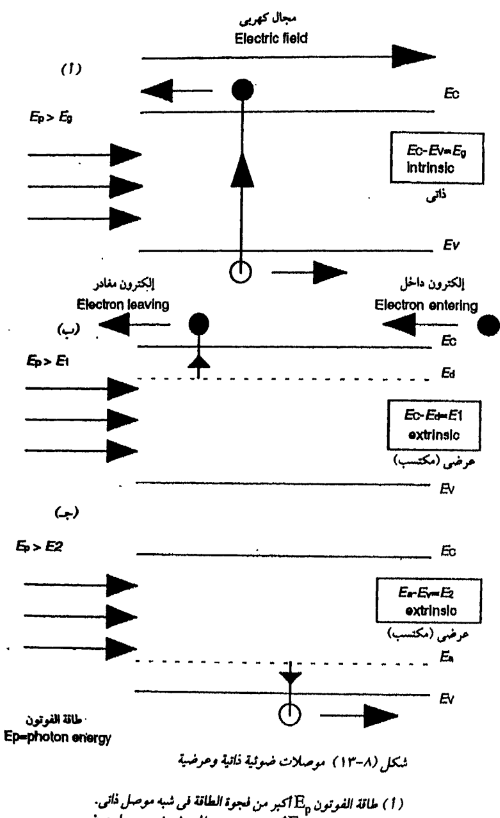
(ب) **التوصيل الضوئى (المكتسب) العرضى**، شكلى (٨-١٣ ب،جـ) فى هذه الحالة يتولد التيار الكهربى فى الدائرة الخارجية نتيجة لتأين ضوئى عند مستوى المانحات أو مستوى المتقبلات. وقد يحدث أن تكون طاقة الفوتون الساقط أقل من نصف فجوة الطاقة فى شبه الموصل فتستغل طاقة هذا الفوتون فى تأيين ذرة شائبة، مانحة كانت أو متقبلة، ومن ثم تتولد إلكترونات وشغرات قابلة للحركة فتسهم بذلك فى التيار الكهربى بالدائرة الخارجية.

لتحليل ما يحدث فى حالة التوصيل الضوئى العرضى، نستعرض التجربة التالية مع الاستعانة بشكل (٨-١٤) عيّنة التجربة هى قطعة صغيرة من شبه موصل فيها مستوى منح وحيد، يتم تأيين هذا المستوى ضوئيا. ولتبسيط المهمة، نحفظ شبه الموصل عند درجة حرارة منخفضة للغاية بحيث لا يمر تيار كهربى فيه بتأثير مجال كهربى خارجى عند إظلام العينة، يعبر عن ذلك بشكل (٨-١٤ أ) حيث يبقى الإلكترون عند مستوى المنح (ذرة شائبة) ولا يمر تيار لعدم وجود شحنات حرة. إذا سقط فوتون واحد ذو طاقة كافية لإحداث التأين لذرة مانحة، شكل (٨-١٤ ب) يتحرك الإلكترون الناتج من عملية التأين مبتعدا فى الاتجاه المبين نحو الوصلة الأومية الطرفية. وللإبقاء على التعادل الكهربى فى شبه الموصل، فور أن يغادر هذا الإلكترون الكاشف الضوئى سيدخل إلكترون آخر من الوصلة الأومية الأخرى. بذلك نحصل على تيار من إلكترونين مقابل فوتون واحد، ومن الطبيعى أن تستمر هذه العملية خلال فترة زمنية محددة τ، تعرف بزمن بقاء (حياة) حاملة الشحنة، بعدها يتم اصطياد الإلكترون بواسطة مراكز اصطياد تقع عند مستوى المنح، شكل (٧-١٢ جـ).

إذا كان زمن اجتياز الإلكترون للكاشف (الموصل) الضوئى، وهو ما يعرف أيضا بـ «زمن العبور t »، فإن التكبير أو الكسب A يعطى بالعلاقة :

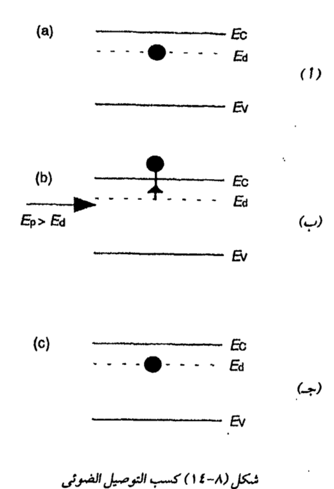
$$A = \frac{\tau}{t} \qquad (8\text{-}2)$$

تكشف هذه العلاقة أين تكمن المهارة الأساسية عند تصنيع نبيطات التوصيل الضوئى، ففى النبيطة السريعة الاستجابة يلزم استخدام مادة تتميز بزمن حياة τ قصير إلا أن حساسية مثل هذه النبيطة تكون ضعيفة. أما فى المواد ذات التكبير العالى، تشتد الحساسية لمستويات الضوء الخافت غير أنها تكون ضعيفة الاستجابة للترددات.



شكل (٨-١٣) موصلات ضوئية ذاتية وعرضية

(أ) طاقة الفوتون E_p أكبر من فجوة الطاقة فى شبه موصل ذاتى.
(ب) طاقة الفوتون E_p أكبر من مستوى المنح فى شبه موصل عرضى.
(جـ) طاقة الفوتون E_p أكبر من مستوى الاستقبال فى شبه موصل عرضى مكتسب.



شكل (٨-١٤) كسب التوصيل الضوئى

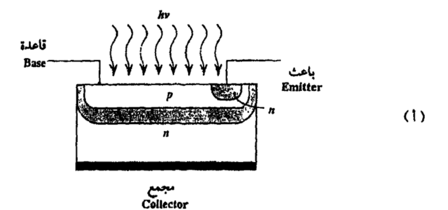
(٨-٦) الترانزيستور الضوئى The Phototransistor

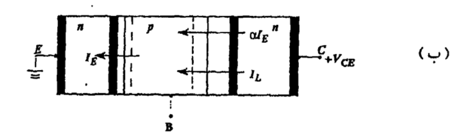
الترانزيستور الضوئى نبيطة ثنائية القطب، تقوم بعمل كاشف ضوئى، إضافة إلى قدرتها على تكبير التيار الكهربى كمضخم ترانزيستورى جيد.

يبين شكل (٨-١٥) رسما تخطيطيا لترانزيستور *npn* ضوئى. عند الإضاءة نجد أن الإلكترونات والشغرات التى تنتج وفى وجود الانحياز العكسى عند وصلة المجمع - قاعدة تُكتسح فى المجال الكهربى مولدة تيار إضاءة I_L، وينشأ تيار القاعدة من حقن الشغرات إلى داخل القاعدة فتدفع بدورها عملية حقن الإلكترونات من الباعث.

من الشكل يمكن استنتاج أن :

$$I_E = \alpha I_E + I_L \tag{8-3}$$





شكل (٨-١٥) (أ) نبيطة الترانزيستور الضوئى.
(ب) النبيطة فى نمط القاعدة المفتوحة.

حيث α معامل تكبيـر الترانزيستور فى نمط القاعدة المشتركـة وبما أن الترانزيستور يعمل بفتح دائرة القاعدة، فإن $I_C = I_E$، وبذلك تصبح العلاقة السابقة :

$$\boxed{\frac{I_C}{I_L} = \frac{1}{1-\alpha}} \qquad (8\text{-}4)$$

وحيث إن قيمة α تقترب من الواحد، فإن العلاقة السابقة تظهر تكبيرا عاليا للتيار الكهربى. هذه الخاصـية بالإضافة إلى خاصيـة التشويش المنخفض أعطيا للنبـيطة أهمية عظمى فى استـخدامات كـثيرة، على الرغم من كـبر السعة الكهـربية المصاحـبة لوصلة المجمع، قاعدة والتى حدّت من استجاباتها للترددات العالية.

(٨-٧) كسب الموصلة الضوئية Photoconductive Gain

عند سقوط ومضة ضوئية فجائية لتوليد فائض من حاملات الشحنة، شكل (٨-١٢) ومتابعة إعادة التئام الحاملات مع الوقت، فإنه يمكن التوصل إلى العلاقة :

$$n = n_o \exp(-t/\tau) \qquad (8\text{-}5)$$

حيث تمثل n_o تركيز الحاملات عند بدء سقوط الضوء $t = 0$

، n تركيز الحاملات بعد زمن قدره t

، . τ زمن حياة حاملات الشحنة

ويكون معدل الالتئام عندئذ $(1/\tau)$. عند التأثير على الموصل الضوئى بطاقة ضوئية P_{opt} منتظمة وأكبر قليلا من فجوة طاقة الموصل، يتعين عدد الفوتونات التى تصل السطح بانتظام فى الثانية بالعلاقة :

$$\text{No. of Photons /s} = \frac{P_{opt}}{h\upsilon} \qquad (8\text{-}6)$$

حيث تمثل υ تردد الفوتون. لا تعمل كل هذه الفوتونات على توليد حاملات الشحنة وليتحدد عدد هذه الحاملات بالمعامل η ويطلق عليه «مردود الكم»، وبذلك تصبح عدد الحاملات الحرة فى الثانية:

$$\text{No. of Free Carriers /s} = \eta \frac{P_{opt}}{h\upsilon} \qquad (8\text{-}7)$$

ويعرف معدل التوليد G بعدد حاملات الشحنة المتولدة فى وحدة الزمن وفى وحدة الحجوم ويعطى بالعلاقة :

$$G = \eta \left(\frac{P_{opt}}{h\upsilon}\right) \left(\frac{1}{WLD}\right) \qquad (8\text{-}8)$$

حيث تمثل (WLD) فى شكل (٨-١٢) حجم النبيطة. ويُعطى معدل إعادة الالتئام بالعلاقة :

$$R = n / \tau \qquad (8\text{-}9)$$

عند حالة الاستقرار يصبح :

معدل التوليد = معدل إعادة الالتئام

$$\frac{n}{\tau} = \eta \left(\frac{P_{opt} / h\upsilon}{WLD} \right) \qquad (8\text{-}10)$$

وحيث إنه يمكن التعبير عن التيار الضوئى I_p المار بالعلاقة :

$$I_p = \varepsilon \sigma D W = D W q n \, v_d \qquad (8\text{-}11)$$

حيث تمثل ε شدة المجال الكهربى المؤثر

، σ الموصلية الكهربية لشبه الموصل

، v_d سرعة انسياق حامل الشحنة

فإنه بالتعويض عن تركيز الحاملات n من المعادلة (8-10) فى المعادلة (8-11) نحصل على:

$$I_p = q \tau \eta \left(\frac{P_{opt}}{h\upsilon} \right) \left(\frac{v_d}{L} \right) \qquad (8\text{-}12)$$

ويعرف التيار الضوئى الأمامى I_{pri} بأنه التيار المار نتيجة سقوط فوتونات فعالة (مع الأخذ فى الاعتبار المردود الكمى) ويعطى بالعلاقة :

$$I_{pri} = q\eta \left(\frac{P_{opt}}{h\upsilon} \right) \qquad (8\text{-}13)$$

من هذه العلاقت يمكن حساب قيمة التكبير أو الكسب للموصل الضوئى من خلال النسبة :

$$A = \frac{I_p}{I_{pri}} = \frac{v_d \tau}{L} \qquad (8\text{-}14)$$

وبالتعويض عن زمن العبور t_{tr} بالعلاقة :

$$t_{tr} = \frac{L}{v_d} \qquad (8\text{-}15)$$

تصبح علاقة التكبير على الصورة :

$$\boxed{A = \frac{\tau}{t_{tr}}} \qquad (8\text{-}16)$$

(٨-٨) الخلية الشمسية Solar Cell

رأينا فيما سبق كيفية تولد ضوء أو الكشف عنه باستخدام الوصلة $p\ n$. وفيما يلى نستعرض كيف يمكن توليد قدرة كهربية من هذه الوصلة المتواضعة. ففى البند (٨ ـ ٥) استخدمت الوصلة $p\ n$ مع انحياز عكسى كموصل ضوئى. وفى الحقيقة يمكن الاستغناء عن هذا الانحياز العكسى، فلو أضيئت الوصلة $p\ n$ عند انعدام الانحياز العكسى تظل آلية فصل الشحنات قائمة، كما هى دون تغير بالقرب من طبقة النضوب وداخلها.

ويمكن ملاحظة الشحنات المتحركة كتيار خارجى للموصل الضوئى، كما يمكن قياس «الجهد الضوئى» الناتج عند طرفى النبيطة. ويبين شكل (٨ ـ ١٦) منحنيات $I - V$ المميزة للوصلة $p\ n$ فى الموصل الضوئى، عند ثلاثة مستويات إضاءة مختلفة واعتبار الطاقة الضوئية الساقطة أكبر من فجوة الطاقة فى شبه الموصل بالنبيطة ويلاحظ أن الوصلة المضاءة تولد فرق جهد ملحوظ عند طرفى النبيطة مع عدم مرور تيار كهربى ويعرف بجهد الدائرة المفتوحة V_{oc}، كما تعرف هذه الظاهرة بالظاهرة الفوتوفولتيه. تحسب قيمة هذا الجهد من معادلة الثنائى المثالى وهى المعادلة (73 - 5):

$$I = I_o \left\{ exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right\}$$

حيث يستعاض عن V بالقيمة V_{OC} ، وعن I بقيمة التيار الضوئى I_p وتئول العلاقة السابقة إلى:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \quad ln \quad \left(1 + \frac{I_p}{I_o} \right) \qquad 8 - 17.$$

يمكن تقدير القيمة القصوى لهذا الجهد إذا وضع فى الاعتبار أن جهد الدائرة المفتوحة لا يمكن أن يزيد عن الجهد الداخلى المبيت داخليا V_{bi} فى الثنائي وهذا بدوره لا يزيد عن فجوة الطاقة E_G فى شبه الموصل. بذلك نحصل على الارتباط التالى:

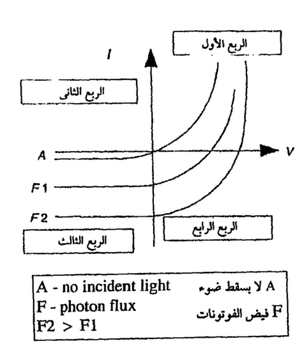
$$V_{OC} < V_{bi} < \frac{E_G}{q} \qquad 8 - 18$$

والقيمة النموذجية لجهد الدائرة المفتوحة فى الخلية الشمسية السيليكونية أقل من الفولت الواحد. كما أن الخلية الجيدة يمكنها أن تعطى فى الدائرة المقصرة تيارا قدره 20 mA أو أكثر لكل سنتيمتر مربع من سطح الثنائى، ويجب الحفاظ على هذه القيم إذا أريد الحصول على قدرة نافعة من الخلية الشمسية، وهذا يتطلب أن تُرص خلايا عديدة على التوالى لزيادة الجهد وترص خلايا عديدة على التوازى لدعم التيار، ويؤدى ذلك إلى افتراش مساحات شاسعة بالخلايا الشمسية للوصول إلى قدرة كهربية فعالة. وتجب الإشارة فى هذا المجال إلى «معامل الكفاية» ولتعريفه نختار من شكل (٨ ـ ١٧) واحدا من منحنيات $I - V$ المميزة عند مستوى إضاءة معين. فيها V_{oc} يمثل جهد الدائرة المفتوحة، I_{sc} تيار الدائرة المقصرة وتحدد أقصى قدرة ممكنة، تبعا لهذه القيم بمستطيل القدرة العظمي المظلل فى الشكل وفيه يمثل I_m قيمة أقصى تيار، V_m قيمة أقصى جهد تتيحهما الخلية، فيتحدد معامل الإمتلاء بالعلاقة:

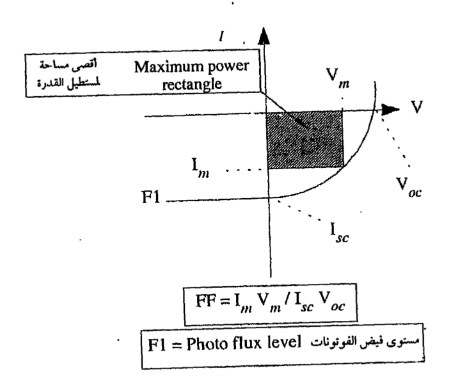
$$\textit{Fill Factor} = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} = \text{معامل الامتلاء} \qquad 8-19$$

وتمثل هندسيا بالنسبة بين مساحتى مستطيل القدرة القصوى والجزء المحصور بين المنحنى المميز $I - V$ المحاور.

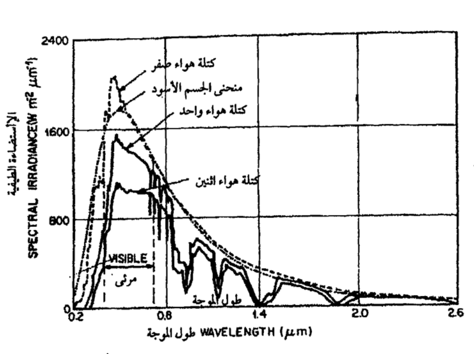
يعتبر تصنيع الخلية الشمسية أمرًا بالغ الصعوبة إذا قورن بتصنيع كاشف (موصل) ضوئى. ففى حالة الكاشف الضوئى المعتاد نحتاج فقط إلى فوتون أحادى الموجة للتعرف عليه، فيسهل تصميم الكاشف. أما فى حالة الخلية الشمسية فإن ما يسقط عليها من الطيف الشمسى، غير متجانس وتقدر أطوال موجاتها بين $0.3 \mu m$ إلى $1.5 \mu m$، انظر شكل (٨ ـ ١٨)، وهذه القيم لا تناسب الخلايا الشمسية السيليكونية التى تكون غير حساسة لتلك الموجات التى تزيد عن واحد ميكرون والموجات شديدة القصر. وهكذا نجد أن أحد المشاكل المهيمنة هى أننا نحاول الكشف عن حزمة ضوئية عريضة من الطيف باستخدام شبه موصل ذى فجوة طاقة وحيدة. قد تكون من المهارة تصنيع نبيطة تشمل عددا كبيرا من أشباه موصلات مختلفة لتغطية أكبر قدر من الطيف الكهرومغناطيسى الشمسى ـ إلا أن هذه الفكرة تحف بها مشاكل صعبة من وجهة نظر المواد. وإذا اختزل الأمر إلى زوج من وصلات $p\ n$ بات ضروريا أن تتواءما وإلا اضطربت كفاءة النبيطة.



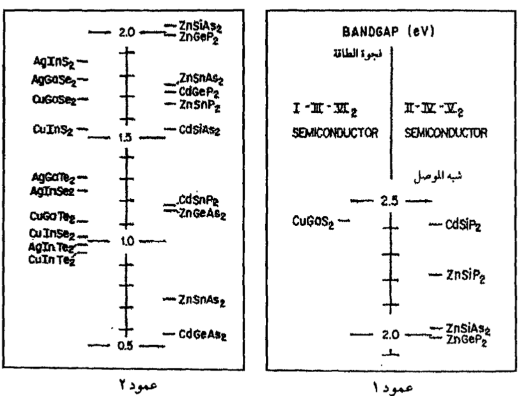
شكل (٨ ـ ١٦) منحنيات I - V المميزة لوصلة p - n



شكل (٨ ـ ١٧) مستطيل القدرة القصوى
وحساب معامل الكفاية



شكل (٨ ـ ١٨) طيف الإشعاع الشمسى
لحالات مختلفة من وزن الهواء



جدول (٨ ـ ٣) أشباه موصلات مركبة
للخلايا الشمسية

وعلى الرغم من هذه الصعاب، أمكن تصنيع خلايا متعددة الوصلات باستخدام أشباه موصلات مركبة بدلا من السيليكون، جدول (٨ ـ ٣). وتلعب كمية الضوء الساقطة على الخلية الشمسية دورا هاما. فعند استخدام السيليكون يتم أسر الضوء إلى داخل سطح البلّورة عن طريق طلاء السطح بمادة مانعة للانعكاس، غير أن هذه العملية تكون فعالة فقط لطول موجي محدد. وكوسيلة لأسر أكبر قدر ممكن من الإشعاع الشمسى الساقط على الخلية، أمكن إعداد سطح منمش بريقة الحفر الكيميائى لمستويات ذرية معينة فى بلّورة السيليكون بهدف تغطية سطح الخلية الشمسية بغمازات هرمية تبعد بعضها عن بعض بإزاحات تقل عن $100\ \mu m$، ويسمح ذلك بتوجيه أكبر قدر ممكن من الضوء إلى داخل الخلية. ويتضح كل ذلك فى الأشكال (٨ ـ١٩). وبالنسبة لتثبيت الأقطاب التى تحمل التيار الضوئى فى الخلية، ليست هناك مشكلة فى تثبيت القطب الخلفى على السطح غير المعرض للضوء. ولتجنب حجب الضوء عن السطح الأمامى المعرض للضوء، صمم القطب الأمامى على هيئة أصابع فلزية رقيقة، تثبت عبر السطح الأمامى وهذه الأصابع تتصل بقضيب سيار سميك كموصل جيد للكهربية عند طرف الخلية، ويتضح ذلك فى شكل (٨ ـ ٢٠).

مثال (٨ ـ ٦):

وصلة $p\ n$ سيليكونية طويلة انحيازها العكسى $2\ V$. وفى نبيطة صفاتها كالتالى:

مساحة مقطع الثنائى	$A = 10^{4}$	μm^2
إشابة الناحية p	$N_A = 2 \times 10^{16}$	cm^{-3}
إشابة الناحية n	$N_D = 10^{16}$	cm^{-3}
معامل انتشار الإلكترون	$D_n = 20$	cm^2/s
معامل انتشار الشفره	$D_p = 12$	cm^2/s
زمن حياة الحاملات الأقلية من الإلكترونات	$\tau_n = 10^{-8}$	s
زمن حياة الحاملات الأغلبية من الشفرات	$\tau_p = 10^{-8}$	s
معدل إعادة الالتئام من الإلكترونات والشفرات	$G_t = 10^{22}$	$cm^{-3}\ s^{-1}$

احسب التيار الضوئى.

الحل:

طول انتشار الإلكترون $L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = \left\{ (20)(10)^{-8} \right\}^{1/2}$

$$= 4.5 \quad \mu m$$

طول انتشار الشفره $L_p = \sqrt{D_T \tau_p} = \left\{ (12)(10)^{-8} \right\}^{1/2}$

$$= 3.46 \quad \mu m$$

ولحساب سمك طبقة النضوب تقوم بحساب الجهد المبيت:

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

$$= 0.026 \ \ln \left(\frac{(2 \times 10^{16}) \times (10)^{16}}{(1.5 \times 10^{10})^2} \right) = 0.715 \quad V.$$

وتصبح سمك طبقة النضوب:

$$W = \left\{ \frac{2\varepsilon_{si}}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \left(V_{bi} + V_R \right) \right\}^{1/2}$$

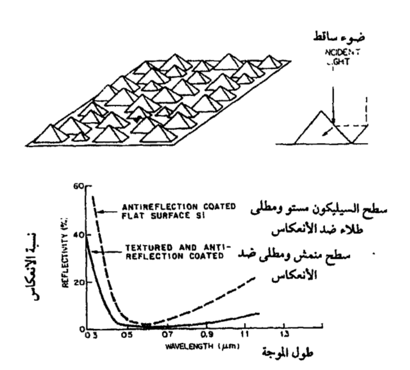
$$W = \left\{ \frac{2\,(11.9)\,(8.85 \times 10^{-14})}{1.6 \times 10^{-19}} \left(\frac{12 \times 10^{16} + 1.0 \times 10^{16}}{(2 \times 10^{16})\ (1.0 \times 10^{16})} \right) (0.715 + 2) \right\}^{1/2}$$

$$= 0.73 \quad \mu m.$$

ويكون التيار الضوئى:

$$I_L = qA\,G_L \ (W + L_n + L_p)$$

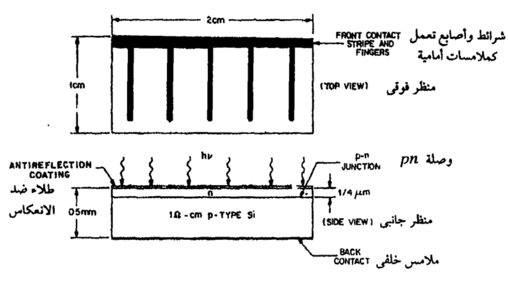
$$= 0.137 \qquad mA$$



شكل (٨ ـ ١٩)

(أ) سطح خلية شمسية سيليكونية مغطاة بغمازات هرمية.

(ب) رسم بيـانى يبين تأثير نـوع السطح وطلائه بمادة مـانعـة للانعكاس على نسبة الانعكاس.



شكل (٨ ـ ٢٠)

السطح العلوى والجانبى لخلية شمسية سيليكونية

مثال (٨ ــ ٧):

خلية شمسية سيليكونية عند 300 K فيها:

المساحة p	cm^2	$A = 1$
إشابة مستوى المتقبلات	cm^{-3}	$N_A = 5 \times 10^{17}$
إشابة مستوى المانحات	cm^{-3}	$N_D = 10^{16}$
معامل انتشار الإلكترون	cm^2/s	$D_n = 20$
معامل انتشار الشفرة	cm^2/s	$D_p = 10$
زمن إعادة الإلتئام للإلكترونات	s	$\tau_n = 3 \times 10^{-7}$
زمن إعادة الإلتئام للشفرة	s	$\tau_p = 10^{-7}$
التيار الضوئى	mA	$I_L = 25$

احسب جهد الدائرة المفتوحة للخلية الشمسية:

الحل:

أولا: يجب حساب تيار التشبع I_o من العلاقة:

$$I_o = A \left\{ \frac{q D_n n}{L_n} + \frac{q D_P p}{L_p} \right\} = Aqn_i^2 \left\{ \frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_P}{L_p N_D} \right\}$$

ولكن:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = \left\{ (20)(3 \times 10)^{-7} \right\}^{1/2} = 24.5\ \mu m$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \left\{ (10)(10)^{-7} \right\}^{1/2} = 10 \quad \mu m$$

بالتعـويض فى علاقة تيـار التشـبع نحصل على $I_o = 3.66 \times 10^{-11}$ A. فيكون جهد الدائرة المفتوحة V_{oc} هو:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q}\ ln \left(1 + \frac{I_L}{I_o} \right)$$

$$= (0.026)\ ln \left(1 + \frac{25 \times 10^{-3}}{3.66 \times 10^{-11}} \right) = 0.53\ V.$$

(٨ـ٩) السيليكون الأمورفى والخلايا الشمسية

Amorpohous Silicon and Solar Cells

لا شك أن عنصر السيليكون قد لعب ولا يزال يلعب دورا هاما فى التقنيات الإلكترونية التى تقوم على أشباه الموصلات، والحصول على هذا العنصر فى صورته البلّورية ليس بالأمر الهين تكنولوچيا واقتصاديا. وقد كان عام ١٩٥٤ شاهدا على صناعة أول خلية شمسية ذات كفاءة تحويل للطاقة الضوئية إلى طاقة كهربية لا تزيد عن ٦٪ وكانت تلك الخلية من وصلة *pn* مأخوذة من بلّورة سيليكون أحادية. وقد ساعد ارتياد الفضاء على ازدهار بحوث الطاقة الشمسية للحصول على مصادر للطاقة الكهربية اللازمة لتشغيل الأجهزة على سفن الفضاء، فضلا عما تتبوأ به الخلايا الشمسية من مكانة آخذة فى الازدياد والأهمية فى التطبيقات المختلفة على سطح الأرض.

وقد توالت الدراسات والبحوث بما رفع كفاءة التحويل لبلّورات السيليكون إلى ١٩٪ بينما وصلت الكفاءة إلى ٢٣٪ فى الخلايا المكونة من مادة زرنخيد الجاليوم Ga As ثم اتجهت الدراسات إلى خفض تكلفة الحصول على خلايا شمسية باستخدام أشباه الموصلات الأمورفية. وتحقق ذلك لأول مرة عام ١٩٧٤، حيث تم ترسيب أغشية أمورفية شبه موصلة من مادة السيليكون الأمورفى المهدرج (a – Si: H) واستخدم لهذا الغرض تفريغ توهجى خلال مادة السايلان ($Si\ H_4$) المتوهجة. وقد وجد أن تلك الأغشية مكونة من سبيكة «زجاجية» من السيليكون والهدروچين وتعتمد مقاومتها النوعية على درجة حرارة الطبقة السفلية الحاملة للغشاء (الركيزة). كما تحتوى الأغشية على كميات محسوسة من الهدروچين المترابط، أى الذى يعادل الروابط الكيميائية التى قد تصبح فى ظروف أخرى روابط مدلاة أو متأرجحة وهكذا تقل نسبيا كثافة الحالات فى فجوة الطاقة.

ويعتمد تركيز الهدروچين فى (a - Si: H) على ظروف الترسيب، كدرجة حرارة الركيزة ونوع التفريغ والقدرة المستهلكة فى عملية التفريغ وضغط غاز SiH_4 ومعدل انسيابه. ويبين شكل (٨ ـ ٢١) مقارنة لتغير قيمة معامل الامتصاص مع الطول الموجى لكل من بلّورة سيليكون أحادية والسيليكون الأمورفى

(٨ـ١٠) هياكل الخلايا الشمسية

The structure of Solar Cell

تشمل هذه الهياكل خلايا حاجز شوتكى ووصلات $p\ n$ ووصلات $p-i-n$ والوصلات غير المتجانسة.

٨ـ١٠ـ١ خلايا حاجز شوتكى:

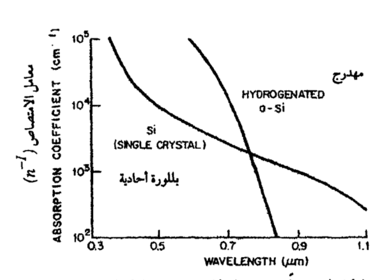
تصنع أبسط هذه الخلايا بترسيب السيليكون الأمورفى المهدرج وغير المشاب على طبقات حاملة من فلزات كالحديد Fe والموليبدنم Mo، ثم يتم بعد ذلك تبخير غشاء رقيق من فلز ذى دالة شغل مرتفعة كالبلاتين بسمك يصل إلى نحو 50 A° فوق طبقة السيليكون. وقد وجد أن دمج طبقة رقيقة مشابة بالفوسفور بسمك يقرب من 0.1 μm فوق الطبقة التحتية مباشرة يحسن من عمل الخلايا، وتصنع هذه الطبقة المشابة عادة من تفريغ توهجى فى $Si\ H_4$ يحتوى على ما يقرب من ١٪ من pH_3. ويرمز لخلايا حاجز شوتكى بالأحرف *MIS* حيث يرمز حرف *M* إلى الفلز، *I* إلى العازل، *S* إلى شبه الموصل. وهذه الخلية بدون طلاء مضاد للانعكاس لا تنفذ سوى ٤٠٪ إلى ٥٠٪ من الضوء الساقط عليها ويزداد إلى ٨٠٪ أو ٩٠٪ بوضع طبقة مضادة للانعكاس بسمك 450 Å تقريبا من مادة أكسيد الزركونيوم $Zr\ O_2$ أو أكسيد التيتانيوم $Ti\ O_2$ أو نيتريد السيليكون $Si_3\ N_4$. شكل (٨ ـ ٢٢أ).

٨ـ١٠ـ٢ وصلات pn ووصلات $p-i-n$

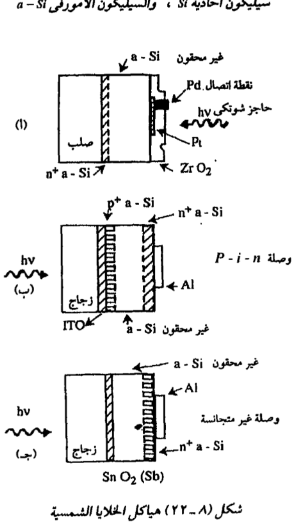
تصنع خلايا وصلات $p\ n$ ترسيب طبقة من $a-Si:H$ مشابة بالفوسفور فوق طبقة أخرى مشابة بالبورون أو العكس. أما خلايا وصلات $p-i-n$ فيستخدم فيها طبقة غير مشابة ذات سمك يصل إلى 1 μm تقريبا وطبقتان رقيقتان هما n^+ , p^+ ملاصقتان للقطبين الأمامى والخلفى على الترتيب. ويتراوح سمك هاتين الطبقتين بين 1000 Å إلى 300 Å وتجهزان داخل تفريغ توهجى لمادة $Si\ H_4$ يحتوى على نحو ١ ٪ من pH_3 أو B_2H_6 (شكل ٨ ـ ٢٢ب).

٨ـ١٠ـ٣ خلايا الوصلات غير المتجانسة

صنعت أولى هذه الخلايا بترسيب $a-Si:H$ غير المشاب فوق طبقات زجاجية حاملة ومغطاة إما بطبقة من أكسيد الأنديوم والقصدير ITO أو بأكسيد القصدير $Sn\ O_2$ المشاب بالأنتيمون Sb. ويتم ترسيب طبقة $n+\ a-Sn$ فوق الطبقة غير المشابة لتوفير اتصال كهربى أومى لقطب الألومنيوم شكل (٨ ـ ٢٢ جـ).



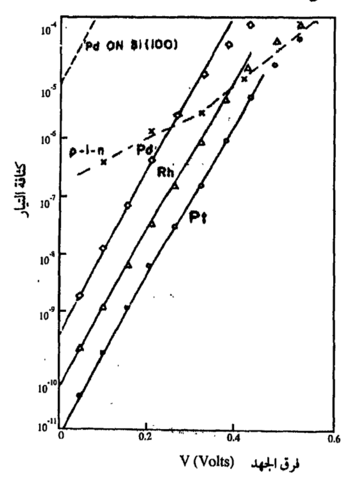
شكل (٨ ـ ٢١) تغير معامل الامتصاص مع طول الموجة فى بلورة سيليكون أحادية Si ، والسيليكون الأمورفى a – Si



شكل (٨ ـ ٢٢) هياكل الخلايا الشمسية

ويلخص شكل (٨ ـ ٢٣) المنحنيات $I - V$ المميزة عند الإظلام لحالات حواجز شوتكى للفلزات Pt, Rh, pd المترسبة على a – Si: H وكذا فى حالات Pd مع السيليكون البلورى ومع وصلة $p - i - n$.

تتأثر الخواص الفوتوفلتية للخلايا الشمسية المصنعة من السيليكون الأمورفى المهدرج بدرجة حرارة الطبقة التحتية (الركيزة) فإذا كانت عند أقل من ٢٠٠ درجة مئوية أثناء عملية الترسيب، فإن الخواص الفوتوفولتية تسوء بشكل حاد نظرا لزيادة كثافة العيوب التركيبية وكذلك الحال إذا ارتفعت درجة حرارة الركيزة فوق ٤٠٠ درجة مئوية أثناء التجهيز، وتصبح العيوب عبارة عن روابط كيميائية متأرجحة، تنشأ عن انتشار ذرات الهدروچين وخروجها من الغشاء، وهكذا نجد أن الخلايا ذات الكفاءة المثلى عند استعمال a – Si: H هى تلك التى تجهز عند درجات حرارة للركيزة تقع بين ٢٠٠، ٤٠٠ درجة مئوية. والخلاصة أن الخلايا الشمسية المجهزة من هذه المواد تعتمد على ركائز من زجاج أو صلب يجعل إنتاجها اقتصاديا للغاية، مما يبشر بطاقة نظيفة ورخيصة ومستمدة من مصدر دائم هو الشمس.



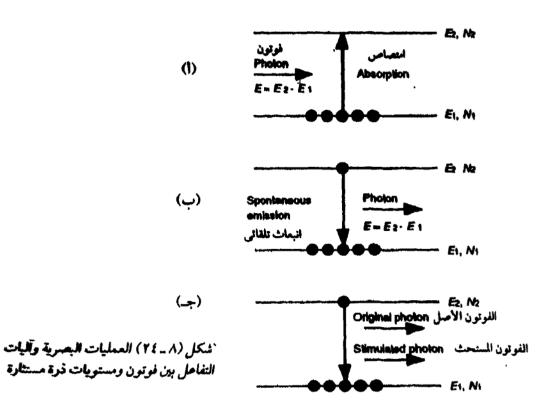
شكل (٨ ـ ٢٣): المنحنيات المميزة للتيار مع فرق الجهد لحواجز شوتكى (فى الظلام) المكونة من Pd و Rh و Rt المترسبة على a – Si: H وكذا بيانات لحاجز شوتكى للبلاديوم Pd على السيليكون البلورى ووصلة P – i – n فى a – Si: H.

(٨ـ١١) أشباه الموصلات والليزر

The Semiconductors Laser

أصبح الليزر بشكل عام وليزر أشباه الموصلات بشكل خاص مألوفا بين الناس فى المجتمعات المتقدمة. فأداة توليد الليزر من شبه الموصل خرجت من معامل الأبحاث إلى حيث التطبيقات العامة فى سنوات قليلة. وأخذت هذه النبيطة طريقها إلى مسجل الأقراص المدمجة وفى طابعات الكمبيوتر وأنظمة الاتصال البصرية وداخل قاعات الدروس فى صورة مؤشر يستخدمه المحاضر.

ولكن ما هو الليزر؟. والإجابة على هذا السؤال، نجدها فى مجلدات خاصة بهذا الموضوع إلا أننا نعرض لها فى هذا المجال بصورة مبسطة وبالقدر الذى يتيح لنا استكمال موضوع الكتاب. وكلمة الليزر من مرادفها الإنجليزى LASER اشتقت من: "Light Amplification by Stimulated Emission Radiation" وتعنى "تضخيم الضوء بانبعاث أشعة ضوئية مستحثة"، وذلك فى ذرة ما. وفى شكل (٨ ـ ٢٤) تمثيل



شكل (٨ ـ ٢٤) العمليات البصرية وآليات التفاعل بين فوتون ومستويات ذرة مستثارة

حالات مختلفة لآليات تفاعل فوتون ضوء مع مستويات ذرة مستثارة، كما تخيلها أينشتين. تمثل E_1 حافة نطاق التكافؤ، E_2 حافة نطاق التوصيل فى شبه موصل ذات فجوة طاقة مباشرة وهى الحالة التى سوف نتناولها فى هذا الفصل.

من المعروف فى الذرة المستثارة أنه إذا هبط إلكترون من مستوى الطاقة E_2 إلى المستوى E_1 ينبعث فوتون ضوء. والصور المختلفة للعمليات الضوئية يمكن تلخيصها بالاستعانة بالأشكال التالية:

١ ـ الشكل (٨ ـ ٢٤أ) يمثل امتصاص فوتون ذى طاقة $h\upsilon_{21} = E_2 - E_1$ ليحفز إلكترونا ما فى المستوى E_1 ليقفز إلى المستوى E_2.

٢ ـ شكل (٨ ـ ٢٤ب)، سقوط هذا الإلكترون من المستوى E_2 عائدا إلى مستواه E_1 يتسبب فى انبعاث تلقائى لفوتون ذى طاقة $h\upsilon_{21} = E_2 - E_1$.

٣ ـ شكل (٨ ـ ٢٤ جـ)، يتولد فوتون ذو طاقة $(E_2 - E_1)$ فى عملية انبعاث تلقائى ويتقدم ليجد إلكترونا فى المستوى E_2 ونتيجة لتماثل طاقة الفوتون «المثير» مع فرق مستوى الطاقة $(E_2 - E_1)$ فإنه يحفز هذا الإلكترون ليسقط إلى مستواه الأرضى E_1 مخلفا فوتونا مستحثا دون حدوث امتصاص للفوتون المثير. فيصبح هناك فوتونان لهما نفس الطاقة ومن ثم نفس التردد والطول الموجى خلال عملية تعرف بالتضخيم الفوتونى التى هى أساس تولد الليزر. كما أن الفوتونان يشتركان أيضا فى الاستقطاب والطور والاتجاه.

ونجد فى شكل (٨ ـ ٢٥أ) وفرة كبيرة من الإلكترونات فى المستوى E_2 كما هو فى المستوى E_1 فيما يسمى بالإسكان العكسى المقلوب. إذا صادفت هذه الحالة إلكترونا مثيرا، يحدث انهمار إلكترونى من المستوى E_2 إلى المستوى E_1 بواسطة الانبعاث المستثار، ويكون مصحوبا بانبعاث عدد وفير من الفوتونات المتطاورة (أى لها نفس الطور).

وتتطلب عملية تضخيم الضوء، شكل (٨ ـ ٢٥ ب) أن تطغى عملية الانبعاث المستحث (المستثار) للفوتونات على عمليات الامتصاص. وهذا لا يمكن تحقيقه إلا فى حالة التسكين العكسى المشار إليها. وهى بدورها حالة غير طبيعية ولا تحدث تحت ظروف التوازن الحرارى إلا إذا كانت منظومة الذرات المستخدمة ذات ثلاثة مستويات للطاقة بدلا من مستويين فقط. فإذا كانت N_1 تمثل كثافة إسكان الشحنة فى المستوى E_1

N_2 تمثلها فى المستوى E_2، شكل (٨ ـ ٢٦أ) فإن عملية تضخيم الضوء تعتمد على فرق كثافتى إسكان الشحنة $(N_2 - N_1)$. وفى حالة الإتزان الحرارى عند درجة حرارة TK نجد أن.

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(exp - \frac{E_2 - E_1}{kT} \right) \qquad 8-20$$

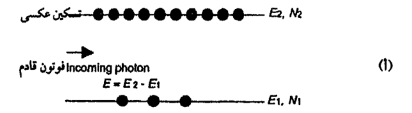
تخبرنا هذه العلاقة أنه فى حالة الاتزان الحرارى تهبط الكثافة العددية للإلكترونات عند مستوى الطاقة الأعلى بصورة أسية مع زيادة الفارق بين مستويى الطاقة، إضافة إلى وجود عدد كبير من الإلكترونات عند مستوى الطاقة الأقل وهذا أمر غير مرغوب فيه إذا كان الهدف هو تفوق الإشعاع المستحث. وفى حالة الاتزان الحرارى تعمل المنظومة على امتصاص الفوتونات فقط شكل (٨ ـ ٢٦ب).

عند التحول من حالة الاتزان الحرارى إلى حالة الإسكان العكسى تمر المنظومة بحالة حرجة يتساوى فيها N_2, N_1 عندها يمكن دفع المنظومة إلى أن تكون منظومة ماصة أو منظومة ذات إسكان عكسى، تؤدى إلى انبعاث مستحث فتصبح مصدراً لليزر.

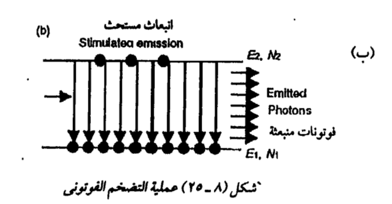
(٨ـ١٢) تهيئة الإسكان العكسى Population Inversion

لإعداد حالة الإسكان العكسى فى شبه موصل يؤخذ فى الاعتبار منظومة ثلاثية من مستويات الطاقة، شكل (٨ ـ ٧) وتوجد بعض الشروط العامة لإتمام عملية التليزر باستخدام الإسكان العكسى. أولها أن المستوى الثانى ويسمى مستوى الضخ هو عبارة عن حزمة من مستويات الطاقة لها اتساع كافى لكى تتيح لمصدر ضوئى تقليدى (والذى يصدر ضوءا واسع الطيف نسبيا) مثل أنابيب التفريغ الغازى أن ينقل عددا وفيرا من الإلكترونات من المستوى (1) لحزمة الضخ (2). تهبط هذه الإلكترونات بمعدل سريع للمستوى الثالث الذى يتميز بأنه حالة كمية (كوانتية) شبه مستقرة (Metastable). وبذلك يتراكم فى المستوى (3) عددا وفيرا من الإلكترونات أكبر بكثير من العدد المتاح عند غياب عملية الضخ إلى المستوى (2). ويطلق على المستوى (3) تسمية مستوى الإسكان العكسى لوجود هذا العدد الوفير من الإلكترونات أثناء وجود عملية الضخ من المستوى الأرضى للمستوى (2). الشرط الأخير هو أن تتمكن إلكترونات المستوى (3) من القفز إلى المستوى الأرضى عبر عملية انبعاث فوتونى. تحرض الفوتونات المنبعثة

(أ)



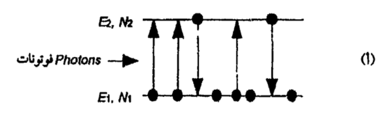
(ب)



شكل (٨ ـ ٢٥) عملية التضخم الفوتوني

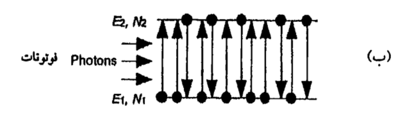


(أ)



(b) High - photon flux فيض فوتوني عالي

(ب)

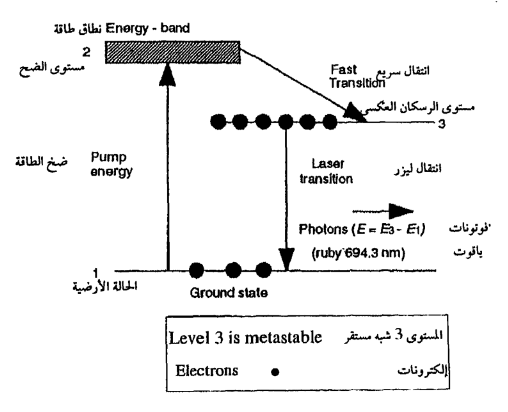


Electrons ● إلكترونات

شكل (٨ ـ ٢٦) محاولة توليد إسكان عكسي

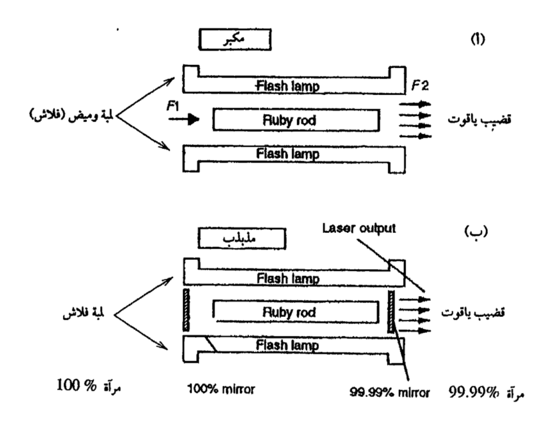
مزيدا مـن الإلكتـرونات على الهبوط من المسـتوى (3) إلى المسـتوى الأرضـى والتى تطـلق بدورها مزيدا من الفـوتونات المحرضة وبذا يحدث انهمار فـوتونى منبعث بشكل ضوء ليزر من فوتونات لها طاقة تساوى الفرق بين طاقتى المستوى (3) والمستوى الأرضى أى $(E_3 - E_1)$.

ولعبت الطبـيعة دورها بإيجاد هذه المنظومـة فى الياقوت وهو يتكون من أكـسيد الألومنيوم مضافا إليه 0.05% بالوزن أكسيد كروم، فكان الليزر الياقوتى وهو أول ليزر أنتجه نيودرو مايمان عام ١٩٦٠ مستخدما بلّورة ياقوت أحادية على شكل أسطوانة طولها بضعة سنتيمترات. تصقل نهايتـه البلّورة، بحيث تكونان متوازيتين ومستويتين تماما. فإذا تم طلاؤهما بطبـقة مانعـة لانعكاس الطول الموجى 694.3 nm المصاحب لـلفوتون ذى الطاقة $(E_3 - E_1)$، ثم ضخت البلّورة إلى مـستوى الإسكان العكسى باستخـدام مصدر ضوئى شديد كمـصباح الزينون وسمح بمرور نبضة ضوئيـة سريعة، طولها الموجى بمرور 694.3 nm خلال الأسطوانة، يحـدث تضخيم لهذه النبـضه لما تسببه مـن انبعاث ذاتى (تلقائى) من مستوى الطاقة الأعلى E_3. ويتولد فيض قدره F_2 من الفوتونات يزيد كثيرا



شكل (٨ ـ ٢٧) منظومة ليزر المستويات الثلاثة

عن الفيض الساقط F_1 وبذلك نحصل على مكبر ليـزرى بسيط، شكل (٨ ـ ٢٨أ). أما إذا فضضت إحدى النهايتين تفضيضا كـاملا بينما تفضض الأخرى جزئيا، بحيث تسمح بانعكاس بعض الضوء ونفـاذ البعض الآخر، ثم يضخ ضوء من المصدر، فـإن الانبعاث اللحظى للفـوتونات يـسبب إثارة ذرات الـكروم وحدوث التـوزيع السـكانى العكسى. وعندما تهـبط الذرات المستثـارة إلى المستوى الأرضى ينبـعث ضوء أحمـر أحادى اللون طوله الموجى 634.8 nm، ويتألق به الياقوت. ويمكن لهذه الفـوتونات المنبعثة تلقائيا أن تبدأ عملية الحث وتولد الانعكاسـات المتتالية بين نهايتى بلّورة الياقوت تفـاعلا متسلسلا يسفر عن تضخيم الضوء لدرجة تجـعله ينطلق على شكل نبضات ضوئية شديدة، شكل (٨ ـ ٢٨ب). ولقـد أدخلت بعد ذلك تعـديلات على الليزر اليـاقوتى زادت مـن قدرة النبضات التى يصدرها، حيث بلغت أكثر من 25 TW.



شكل (٨ ـ ٢٨)
(أ) مكبر ليزرى (ب) مذبذب ليزرى

(١٣.٨) ليزر الوصلة المتجانسة

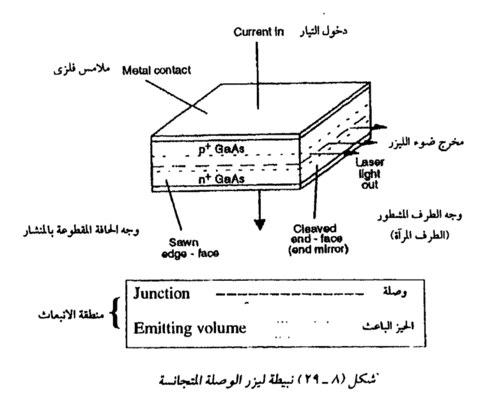
The Homojunction Laser

يبين شكل (٨ ـ ٢٩) أبسط تركيب لنبيطة نُيرراب حقن شبه الموصل وتعرف بليزر الوصلة المتجانسة، وهو يعمل عن طريق حقن حاملات الشحنة عبر الوصلة بدلا من عملية الضخ الضوئى. وتركيب النبيطة يزيد قليلا عن تركيب نبيطة الثنائى الباعث للضوء غير أنها تنتهى عند طرفيها بزوج من المرايا. هذه النهايات العاكسة تنشأ بشق (فلق) بلورة شبه موصل عند مستوياتها البلورية. وتتحدد الانعكاسية من هذه السطوح وفقا لقانون الانعكاس لفرينل:

$$r = \left(\frac{\mu_o - \mu}{\mu_o + \mu} \right)^{1/2} \qquad 8-21$$

حيث تمثل μ_o معامل انكسار الهواء، μ معامل انكسار مادة شبه الموصل. ونتيجة لتربيع القوس يتساوى الأمر إن كان الضوء داخلا أم خارجًا من شبه الموصل.

يمثل مركب زرنخيد الجاليوم Ga As نموذجا لهذه النبيطة. فهو ليزر شبه موصل شائع معامل انكساره 3.66 يمكن تصنيع مرآه تعكس بنسبة 33% من الإشعاع الساقط من فجوة الطاقة بعملية انفلاق بسيطة. وهذه النسبة المنعكسة للفوتونات تقل كثيرا عما



شكل (٨ ـ ٢٩) نبيطة ليزر الوصلة المتجانسة

هى فى حالة مرايا ليزر الياقوت، إلا أن هذا الأمر ليس مهما لأن معامل التضخيم (التضخيم فى وحدة الطول) يزيد كثيرا فى ليزر أشباه الموصلات.

يحدث انبعاث الضوء من النبيطة الممثلة فى شكل (٨ ـ ٢٩) بمثل ما يحدث فى حالة النبيطة LED، فعند التأثير على الوصلة بانحياز أمامى تتم إعادة الالتئام بين الإلكترونات والشغرات ويتولد بذلك فوتونات طاقاتها تساوى فجوة الطاقة. ويحدث الانبعاث التلقائى عند منطقة الوصلة. غير أن الأمر يحتاج إلى أكثر من ذلك للحصول على انبعاث حثى. وهنا لا يستحب الحديث عن الإسكان العكسى، لأن الأمر يختلف هنا عما كان عليه من قبل حين كانت الإلكترونات تلعب وحدها فى الساحة. ويتطلب الأمر عندئذ وجود وفرة كبيرة من الإلكترونات فى نطاق التوصيل وفى نفس الوقت وجود وفرة كبيرة من الشغرات فى نطاق التكافؤ، شكل (٨ ـ ٣٠) ويتيح ذلك أعدادا وافرة من إعادة الالتئام بين الإلكترونات والشغرات عبر فجوة الطاقة مولدة إشعاعا بقدر هذه الطاقة $(E_C - E_V)$.

والطريقة المتبعة للحصول على كميات كبيرة من الإلكترونات وأخرى من الشغرات فى وقت واحد فى نفس المادة هى أن نبدأ بشبه موصل من النوع p يكون مشابا بدرجة تركيز عالية ثم تحقن داخلها كميات كبيرة من الإلكترونات باستخدام الوصلة $p\ n$ (تماما كما فى حالة النبيطة LED) أو أن نبدأ بشبه موصل من النوع n مشاب بدرجة تركيز عالية ثم يحقن داخلها كميات كبيرة من الشغرات. والفرق الفيزيائى بين نبيطة الليزر ونبيطة LED أن الأولى تتميز بكثافة عالية من ازدواج الإلكترونات والشغرات إضافة إلى مستويات حقن أكثر بكثير عما تتميز به النبيطة الثانية.

ويعمل ليزر الوصلة المتجانسة Ga As كشبه موصل باعث للفوتونات فى المنطقة تحت الحمراء وتصل فجوة الطاقة لهذه المادة 1.43 eV تناظر انبعاثا فوتونيا عند $0.87\ \mu m$ ، يقع فى المنطقة المشار إليها من الطيف، ويكون انبعاث الضوء عند منطقة الوصلة غير متماثل لاختلاف طول انتشار حاملات الأقلية من الإلكترونات فى المنطقة p عنه فى المنطقة n فى Ga As؛ وينبعث الضوء من إعادة التئام هذه الحاملات مع حاملات الأغلبية، ويتحقق عدم تماثل الانبعاث حول الوصلة فى شكل (٨ ـ ٢٨)، حيث نجد الحدود المنقطة تمثل حجم الإنبعاث. ولأن الإلكترونات تنتشر إلى مدى أكبر داخل المنطقة p^+ فى شبه موصل *Ga As* قبل إعادة الالتئام، فإن حجم الفوتونات المنبعثة ناحية p من الوصلة تكون أكبر من الحجم المنبعث ناحية n.

ويبين شكل (٨ ـ ٣١) قدرة خرج ثنائى الليزر كدالة لتيار الدخل المحفز وحين تصل قيمة هذا التيار قرب تيار العتبة، حيث توشك عملية التليزر أن تبدأ، تنقلب عملية

وفرة من الإلكترونات Lots of electrons

(أ)

E_c

E_d E_F

E_v

(ب)

وفرة من الشغرات Lots of holes

E_c

E_a E_F

E_v

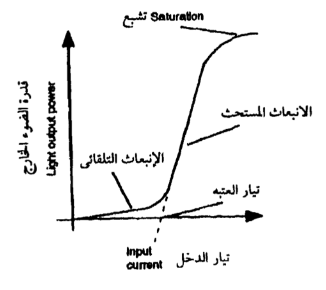
وفرة من الإلكترونات والشغرات Lots of electrons and holes

E_c

(جـ)

E_v

شكل (٨ ـ ٣٠) إسكان حاملات الشحنة فى شبه الموصل



شكل (٨ ـ ٣١)منحنى مميز مثالى لنبيطة ليزر شبه موصل

الانبعاث التلقائى فى خرج الضوء، فيعمل ثنائى الليزر تحت هذه الحالة كبنيطة *LED* بسيطة تبعث أمواج غير متطاورة. ومع تخطى قيمة العتبة يبدأ تفوق الانبعاث الحثى وتحدث زيادة سريعة فى قدرة خرج الضوء إثر زيادة التيار المحفز، وتستمر هذه الزيادة حتى حدوث عملية التشبع.

من جهة أخرى، هناك عدد من المشاكل التى ترتبط بليزر الوصلة المتجانسة. فالنبيطة تحتاج إلى تيار كهربائى عال لتحفيز عملية التليزر، تبلغ قيمته $5 \times 10^4\ A/cm^2$ وهذا ناتج جزئيا من ظاهرة انتشار الحاملات، بعيدا عن منطقة الوصلة دون أى عائق بسبب عدم تقييدها فى حيز ضيق. كما أن معاملات انكسار الضوء لمادتى طرفى الوصلة واحدة لكونهما نفس المادة ولكن بدرجات إشابة مختلفة، ويعنى ذلك صعوبة فى تقييد الفوتونات فى حيز محدد وتلك مشكلة أخرى. وللحصول على ليزر كفء يحتاج الأمر إلى تيار تحفيز صغير يولد خرج قدرة عال. وهذا بدوره يحتاج إلى:

(أ) تقييد حاملات الشحنة من الإلكترونات والشغرات فى حيز ضيق لزيادة احتمال عمليات إعادة الالتئام لتوليد الإشعاع.

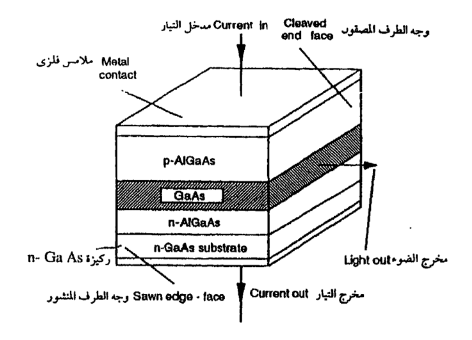
(ب) تقييد الفوتونات فى حيز ضيق لزيادة الانبعاث الحثى اللازم لعملية التليزر. وقد أمكن تحقيق هذين العاملين فى نبيطة ليزر الوصلة غير المتجانسة.

(٨ـ١٤) ليزر الوصلة غير المتجانسة المزدوجة

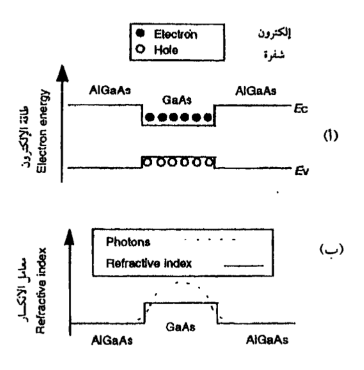
The Double - Heterojunction Laser Diode

يبين شكل (٨ ـ ٣٢) تخطيطا لنبيطة ثنائي ليزر الوصلة غير المتجانسة المزدوجة ويرمز لها بالرمز *DHLD*. تتكون من طبقة فعالة لشبه موصل Ga As بين طبقتين من Al Ga As، العليا من نوع p والسفلى من نوع n من شبه الموصل. ونتيجة لاختلاف المواد على جانبى الوصلة كانت الوصلة غير متجانسة.

ونظرا لكبر فجوة الطاقة فى Al Ga As عنها فى Ga As إنحصرت حاملات الشحنة كما يوضحه شكل (٨ ـ ٣٣أ). وعلى الرغم من اختلاف حجم حافتى عدم الاتصال فى نطاقى التكافؤ والتوصيل واللتان تؤديان إلى حصر حاملات الشحنة كما يوضحه الشكل إلا أن هذا الحجم كاف لحصر الحاملات بقدر فعال ومؤثر. ويتحقق حصر الفوتونات نتيجة لتفوق معامل الانكسار μ_1 لمادة Ga As على معامل الانكسار μ_2 لمادة Al Ga As بذلك تصبح الطبقة الفعالة Ga As محصورة بين سطحين مغلفين للفوتونات إذا ما سقطت على السطح بزاوية أكبر من الزاوية الحرجة والتى تقع فى



شكل (٨ ـ ٣٢) ثنائي ليزر الوصلة غير المتجانسة



شكل (٨ ـ ٣٣) حصر حاملات الشحنة والفوتونات لرفع تركيزاتها

الوسط μ_1 أى فى طبقة Ga As الفعالة، شكل (٨ ـ ٣٣ب) فتبدو عندئذ مثل لوحة دليل موجى تحصر بداخلها الفوتونات.

للوصول إلى كفاءة عالية للوصلة غير المتجانسة يلزم توافق شبيكتى مادتى الطبقة الفعالة والطبقة الملاصقة لها كما هو الحال بين مادتى Al Ga As/ Ga As وكذلك فى مادتى Ga In AsP/ In P اللاتى تستخدم فى توليد ليزر الموجات الطويلة لأغراض الاتصالات، وفى مادتى Al Ga In P/ Ga As، اللاتى تستعمل فى نبيطات توليد ليزر الأطوال الموجية المرئية. أما إذا انعدم توافق الشبيكات المعنية، تنشأ الانخلاعات والعيوب البلورية عند سطح التقاء الوصلة غير المتجانسة وتظهر معها مراكز إعادة التئام غير مشعة ويستحيل تولد الليزر منها.

ويمكن تلخيص المتطلبات الأساسية للحصول على النبيطة DHLD

١ ـ ركيزة مناسبة من بلّورة أحادية تبنى عليها المادة المتليزرة.

٢ ـ تقنية إنماء بلّورى مناسبة لإنماء الطبقة الفعالة وطبقتى الغطاء.

٣ ـ مواد مناسبة بينهما توافق شبيكى، مع تمييز طبقتى الغطاء بفجوة طاقة كبيرة ومعامل إنكسار أصغر بما لدى الطبقة الفعالة.

٤ ـ مصدر إشابة مناسب للإمداد بطبقات الارتداد من الأنواع *n, p* وتسمح بحقن كلا من الإلكترونات والشغرات إلى داخل الطبقة الفعالة.

٥ ـ تقنية مناسبة لعمل وصلات فلزية تثبت على مواد النبيطة كأقطاب تتحمل تيارا كهربيا ذا كثافة عالية.

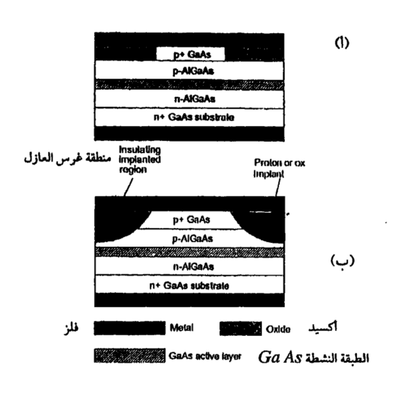
وقد يتوقع المرء أن تقل كثيرا قيمة عتبة التيار المحفز لليزر نتيجة حصر كل من حاملات الشحنة والفوتونات، إلا أن ذلك لا يحدث عمليا. بل تظل هذه العتبة كبيرة للغاية؛ لذلك لزم إجراء المزيد من التعديلات على النبيطة المذكورة بهدف اختزال قيمة تيار العتبة وهذا ما أدى إلى نبيطة ثنائي الليزر الشريطى ونبيطة ليزر الوصلة غير المتجانسة المدفونة.

(٨ـ ١٥) الليزر الشريطى

The Stripe Laser Diode

تتميز نبيطات الليزر التى ورد ذكرها بمساحات عرضية واسعة، تتحدد بحواف النبيطة، لحقن التيار. يؤدى تقليص هذه المساحة إلى اختزال التيار المحقون داخل النبيطة

DHLD كمـا يوصحـه تمكل (٨ . ٣٤) ففى الشكل (أ) بتـحقق دلك بتـصمـيم نافذة محددة فى طبقة الأكسيد ينم حـلالها حقن التيا. وفى الشكل (ب) يتحقق دلك بعمل إتلاف إشعاعى عند حواف شبه الموصل فى النبيطة، فتـتحول المساحات التالفة إلى مادة عازلة وتبقى المساحة المركزية لحـقن التيار وفى أى من هاتين الطريقتين يقل حجم المادة الفعالة للتليزر ويقل تبعا لذلك التـيار اللازم. ويلاحظ فى النبيطة أن الفوتونات لم تقيد فى الاتجاهات المستعرضة فيمكنها أن تنتشـر انتشارا مستعرضا خلال المناطق التى لم يتم الضخ فيـها بالطبقة الفـعالة. ويؤدى حصر الـفوتونات فى هذه الرقعة ووقف انتـشارها المستعـرض إلى تحسين أداء النبيطة وهذا مـا تم تحقيقه فى نبـيطة الوصلة غير المتـجانسة المدفونة.



شكل (٨ ـ ٣٤) ثنائى اليزر الشريطى

(أ) تصميم ذو نافذة محددة فى طبقة الأكسيد.

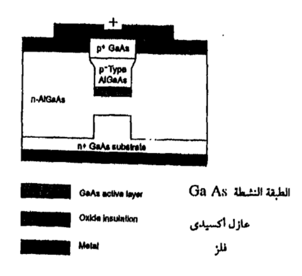
(ب) تكوين نافذة تعمل إتلاف إشعاعى عند حواف شبه الموصل.

(٨-١٦) ليزر الوصلة غير المتجانسة المدفونة

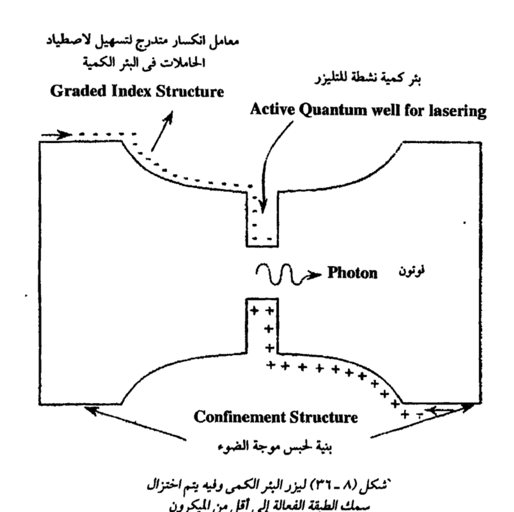
يبين الشكل (٨ ـ ٣٥) تركيبـا لهذه النبيطة وفيها يتم دفن الطبـقة الفعالة GaAs داخل مادة Al Ga As ، معامل انكسارها يقل عما لدى الطبـقة الفعالة. التى تحيط بها من كل جهة. يؤدى اختلاف معاملى الانكسار والذى يبلغ 0.2 إلى حصر الفوتونات فى حيز ضيق للغاية. وهذا بدوره يعمل على توليد حزمة ليزرية ذات كفاءة عالية جدا تفوق ما يتولد من النبيطة السابقة. كما تقل قـيمة تيار العتبة لتصل إلى 10 mA ويزداد التردد المولف (معدل نبضات الضوء) ليصل إلى 2 GHz.

هذه الخصائص مجتمعة جـعلت من هذه النبيطة أداة مثلى تستخدم فى عديد من التطبيقـات منها أنظمة الاتصال بالألياف البـصرية ومسجل الأقراص المدمـجة وطابعات الليزر.

وهكذا تم إلقاء الضوء على نبيطات الليزر ذات الأبعاد العادية، المألوفة فى حدود 100 μm طوليا، 10 μm عرضيـا مع طبقة فـعالة تقدر سمكهـا بالميكرون. وقد يصل الأمر إلى اختزال سمك الطبقة الفعـالة إلى ما هو أقل من ذلك وهذا بدوره سيغير قليلا من طول موجـة الضوء الصادر ويصبح الأمـر غير محكوم بفـجوة طاقة الطبقة الـفعالة وندخل بذلك إلى مجال آخر يعرف بليـزرات البئر الكمى، شكل (٨ ـ ٣٦). وأكثر من ذلك إذا تم اختـزال الأبعاد المستعـرضة إلى 5 μm أو أقل فإننا نحصـل على ما يعرف



شكل (٨ ـ ٣٥) نبيطة ليزر الوصلة غير المتجانسة المدفونة



شكل (٨ ـ ٣٦) ليزر البئر الكمى وفيه يتم اختزال
سمك الطبقة الفعالة إلى أقل من الميكرون

بليزرات السلك المكماة وفيه ينتشـر الليزر فى بعدين بدلا من بعد واحد ومن بين الفوائد الهائلة التى سوف تجلبها أمثال تلك النبائط هو اختـزال تيار التحفيز إلى الميكرو أمبير أو أقل بحيث يتم اندماج أشعة ليزرية متميزة بكفاءة عالية باستخدام قدرة كهربية منخفضة، ونظرا لضخامة سعة المعلومات التى يمكن نقلها بالضوء فسيصبح أهم التطبيقات الواردة. فى هذا المجال هو تـداول المعلومات المختلفـة فى سرعـة ويسر وتتحـقق الدفعـة القوية لسيطرة تقنيات جديدة فى الفوتون ويسيطر على مناحى الحـياة إلا أنه مهما يكن سرعة أداء التقنيات المرتقبة فإنها تـظل بعيدة عن قدرات الخالق الجبارة الآية: ﴿ **يَعْلَمُ مَا يَلِجُ فِي الأَرْضِ وَمَا يَخْرُجُ مِنْهَا وَمَا يَنزِلُ مِنَ السَّمَاءِ وَمَا يَعْرُجُ فِيهَا وَهُوَ الرَّحِيمُ الْغَفُورُ** ﴿٢﴾ ﴾ [سبأ].

(١٧-٨) ملخص الفصل

يختلف هذا الفصل عن باقى فصول الكتاب فى التفاعل بين الضوء وحاملات الشحنة الكهربية.

تعرضنا أولا لنبيطة LED الثنائى الباعث للضوء، وهو عبارة عن ثنائى وصلة $p\,n$ فى انحياز أمامى. عندما تلتئم فيه الإلكترونات مع الشغرات ينبعث الضوء - ثم درسنا المواد اللازمة لتصنيفه.

ثم تناولنا الكواشف المبنية على الموصلية الضوئية وهى ببساطة نبائط p - i - n والتى فيها تتغير الموصلية الكهربية عند سقوط الضوء عليها. يكون كسب الكاشف عاليا إذا كان زمن التئام حاملات الأقلية أكبر من زمن الانتقال - وهذا يسمح للإلكترون أن يعبر النبيطة دون أن يلتئم مع شغره.

ثم تعرفنا على الترانزيستور الضوئى والمبنى على تقنية BJT. التيار الناتج عن الحاملات المتولدة فى القاعدة يمكن تكبيره لإنتاج كاشف بكسب عال.

من أحد التطبيقات الهامة لنبيطات الإلكترونات البصرية هو الخلية الشمسية وهى ثنائى $p\,n$ يعمل بدون انحياز خارجى. حيث يتسبب الضوء الساقط فى توليد جهد وتيار كهربى من الخلية وتتحول بذلك الطاقة الضوئية إلى كهربية.

وفى النهاية قدمنا نبيطة أخرى هامة على المستوى التكنولوچى وهو ثنائى الليزر. فالفوتونات المتولدة فى وصلة $p\ n$ بانحياز أمامى تُقيد داخل تجويف ضوئى. وتُنْتَقَى بعض أنماط الفوتونات لتنمو بواسطة الفجوة بينما تخمد الأنماط الأخرى. والأنماط المختارة تسمح بانبعاث مستحث يولد إشارات ضوئية مترابطة.

واختتم الفصل بتعريف بعض نبيطات الليزر على بِنيات شبه موصلة فائقة الصغر مثل الآبار الكمية والأسلاك والنقط الكَمية.

أسئلة الفصل

١ ـ موصل ضوئى من Ga As من النوع n، طوله $25\,\mu$ m ومساحة مقطعه $10^{-6}\ \text{cm}^2$. فيه زمن بقاء حاملات الأقلية 10^{-6} s . أثر على الموصل بجهد قدره 5 V. احسب الكسب بفرض ثبات قيم التحركية. علما بأن حركية الإلكترون $\mu_n = 8000\ \text{cm}^2/\ \text{V.s}$ وحركيه الشغرة $\mu_p = 1000\ \text{cm}^2/\ \text{V.s}$.

٢ ـ استنتج تعبيرا للتيار الضوئى I_L فى وصلة $p\ n$ قصيرة لثنائى فيه اتساع الرقعه $n\ (W_n)$ أقل بكثير من طول انتشار الشغرة L_p وكذلك اتساع الرقعه $p\ (W_p)$ أقل بكثير من طول انتشار الإلكترون L_n. ومعدل تولد حاملات الشحنة G_L ومساحة مقطع النبيطة S.

٣ ـ خلية شمسية سيليكونية n^+p، مساحة مقطعها $1\ \text{cm}^2$ فيها:

$$\tau_n = 4\times 10^{-7}\ \text{s} \quad , \quad N_A = 2\times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$$
$$G_L = 2.7\times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}\ \text{s}^{-1} \quad , \quad D_n = 5\ \text{cm}^2\ \text{s}^{-1}$$

احسب جهد الدائرة المفتوحة.

٤ ـ يمكن الحصول على أقصى قدرة من خلية شمسية بإيجاد القيمة العظمى لحاصل الضرب IV. بيِّن أن تعظيم القدرة يؤدى إلى:

$$\left(1 + \frac{q\,V_m}{kT}\right) e^{(q\,V_m\,/\,kT)} = 1 + \frac{I_{sc}}{I_{th}}$$

حيث V_m هو الجهد عند أقصى قدرة، I_{sc} تيار الدائرة المقصرة، I_{th} تيار التشبع العكسى المستحث حراريا.

٥ ـ اكتب مقالا عن ليزر أشباه الموصلات موضحا أهم الفروق بين نبيطة ليزر الوصلة المتجانسة وليزر الوصلة غير المتجانسة مع شرح لمعانى التعبيرات التالية:

ليزر البئر الكمى ـ ليزر السلك الكمى ـ ليزر النقطة الكمية.






ملاحق

ملحق (أ) الوحدات

Quantity	Unit	Symbol	
Fundamental Units:			
Length	Meter	m	
Time	Second	s	
Mass	Kilogram	kg	
Temperature	Degree Kelvin	K	
Current	Ampere	A	
Light intensity	Candela	Cd	
Additional Units			
Angle	Radian	rad	
Solid angle	Radian	rad	
Other Named Units			
Frequency	Hertz	Hz	(1/s)
Force	Newton	N	(kg m/s2)
Energy	Joule	J	(Nm)
Pressure	Pascal	Pa	(N/m2)
Power	Watt	W	(J/s)
Electric charge	Coulomb	C	(A s)
Potential	Volt	V	(J/C)
Resistance	Siemens	S	(A/V)
Capacitance	Farad	F	(C/V)
Magnetic flux	Weber	Wb	(V s)
Inductance	Henry	H	(Wb/A)
Magnetic induction	Tesla	T	(Wb/m2)
Light flux	Lumen	Lm	(Cd rad)

ملحق (ب) الثوابت الطبيعية

Quantity	Symbol	Value
Avogadro number	N_{AV}	6.0221367×10^{23} 1/mol
Bohr energy	E_B	13.6060 eV
Bohr magneton	μ_B	5.78832×10^{-5} eV/T
Bohr radius	a_B	0.52917 Å
Boltzmann constant	k_B	1.38066×10^{-23} J/K
Boltzmann constant/q	k_B/q	8.61738×10^{-5} eV/K
Electronic charge	q	1.60218×10^{-19} C
Electronvolt	eV	1.60218×10^{-19} J
Fine structure constant	α	0.00729735308 (≈ 1/137)
Gas constant	R	1.98719 cal mol^{-1} K^{-1}
Gravitational constant	γ	6.67259×10^{-11} $m^3/(kg\ s^2)$
Impedance of free space	$1/c\varepsilon_o = \mu_o c$	376.732 Ω
Mass of electron at rest	m_e	$0.91093897 \times 10^{-30}$ kg
Mass of proton at rest	M_p	$1.6726231 \times 10^{-27}$ kg
Permeability in vacuum	μ_o	1.26231×10^{-8} H/cm ($4\pi \times 10^{-9}$
Permittivity in vacuum	ε_o	8.85418×10^{-12} F/m ($1/\mu_o c^2$)
Planck constant	h	$6.6260755 \times 10^{-34}$ J-s
Reduced Planck constant	$\hbar = h/(2\pi)$	$1.0545727 \times 10^{-34}$ J-s
Speed of light in vacuum	c	2.99792458×10^{8} m/s
Thermal voltage at 300 K	$k_B T/q$	0.025860 V
Wavelengths of visible light	λ	0.4 to 0.7 μm

PROPERTIES OF SILICON (SI)

Property	Value
Atomic number	14
Atoms/cm^3	5.02×10^{22}
Electronic shell configuration	$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^2$
Atomic weight	28.09
Crystal structure	Diamond
Breakdown field (V/cm)[a]	$\sim3.0\times10^5$
Density (g/cm^3)	2.329 (at 298 K)
Dielectric constant	11.7
Diffusion constant (cm^2/s) (at 300 K)[a]	37.5 (electrons) 13 (holes)
Effective density of states	
in the conduction band (cm^{-3})	3.22×10^{19} (at 300 K)
in the valence band (cm^{-3})	1.83×10^{19} (at 300 K)
Effective electron mass (in units of m_e)	longitudinal : 0.92 (at 1.26 K)
	transverse : 0.19 (at 1.26 K)
	density of states : 1.28 (at 600 K)
	1.18 (at 300 K) 1.08 (at 77 K)
	1.026 (at 4.2 K)
Effective hole mass (in units of m_e)	heavy hole : 0.537 (at 4.2 K)
	heavy hole : 0.49 (at 300 K)
	light hole : 0.153 (at 4.2 K)
	light hole : 0.16 (at 300 K)
	density of states : 0.591 (at 4.2 K)
	0.62 (at 77 K) 0.81 (at 300 K)
Electron affinity (V)	4.05
Energy gap (eV)	1.12 (at 300 K) 1.17 (at 77 K)
Index of refraction	3.42
Intrinsic carrier concentration (cm^{-3})	1.02×10^{10} cm^{-3} (at 300 K)
Intrinsic Debye length (μm)	24
Intrinsic resistivity (ohm-cm)	3.16×10^5 (at 300 K)
Lattice constant (Å)	5.43107 (at 298.2 K)
Melting point (°C)	1412
Mobility (cm^2/V-s) (at 300 K)**	1450 (electrons) 500 (holes)
Optical phonon energy (eV)	0.063
Specific heat (J/g-°C)	0.7
Thermal conductivity (W/cm-°C)	1.31 (at 300 K)
Thermal diffusivity (W/cm-°C)	0.9
Thermal expansion, linear (°C^{-1})	2.6×10^{-6} (at 300 K)
Young's modulus (dyn/cm^2)	1.9×10^{12} in [111] direction

From K. Lee, M. Shur, T. Fjeldly, and T. Ytterdal, *Semiconductor Modeling for VLSI*, copyright © Prentice Hall, 1993, reproduced by permission of Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
[a] For undoped or low doped material.

PROPERTIES OF GALLIUM ARSENIDE (GaAs)

Crystal structure	zinc blende
Breakdown field (V/cm)	$\sim 4.0 \times 10^5$
Density (g/cm^3)	5.3176 (at 298 K)
Dielectric constant (κ_s)	12.9 (at 300 K)
(κ_o)	10.89 (at 300 K)
Diffusion constant (cm^2/s) (at 300 K)	207 (electrons) 10 (holes)
Effective density of states	
in the conduction band (cm^{-3})	4.7×10^{17} (at 300 K)
in the valence band (cm^{-3})	7.0×10^{18} (at 300 K)
Effective electron mass (in units of m_e)	0.067 (0 K) 0.063 (300 K)
Effective hole mass (in units of m_e)	heavy hole : 0.51 (at $T < 100$ K)
	: 0.50 (at 300 K)
	light hole : 0.084 (at $T < 100$ K)
	: 0.076 (at 300 K)
	density of states : 0.53
Electron affinity (V)	4.07
Energy gap (eV)	1.424 (at 300 K)
	1.507 (at 77 K)
	1.519 (at 0 K)
Index of refraction	3.3
Intrinsic carrier concentration (cm^{-3})	2.1×10^6 (at 300 K)
Intrinsic Debye length (μm)	2,250 (at 300 K)
Intrinsic resistivity (ohm-cm)	10^8 (at 300 K)
Lattice constant (Å)	5.6533 (at 300 K)
Melting point (°C)	1,240
Mobility (cm^2/V-s)	8,500 (electrons at 300 K)
	400 (holes at 300 K)
Optical phonon energy (eV)	0.035
Specific heat (J/g-°C)	0.35
Thermal conductivity (W/cm-°C)	0.46
Thermal diffusivity (W/cm-°C)	0.44
Thermal expansion, linear (°C^{-1})	6.86×10^{-6} (at 300 K)

ملحق (د) ثوابت مختصرة لأشباه الموصلات الهامة

Properties of Ge, Si and GaAs at 300 K

Property	Ge	Si	GaAs
Atomic/molecular weight	72.6	28.09	144.63
Density (g cm^{-3})	5.33	2.33	5.32
Dielectric constant	16.0	11.9	13.1
Effective density of states			
Conduction band, N_C (cm^{-3})	1.04×10^{19}	2.8×10^{19}	4.7×10^{17}
Valence band N_V (cm^{-3})	6.0×10^{18}	1.02×10^{19}	7.0×10^{18}
Electron affinity (eV)	4.01	4.05	4.07
Energy gap, E_g (eV)	0.67	1.12	1.43
Intrinsic carrier			
concentration, n_i (cm^{-3})	2.4×10^{13}	1.5×10^{10}	1.79×10^{6}
Lattice constant (Å)	5.65	5.43	5.65
Effective mass			
Density of states m_e^*/m_o	0.55	1.18	0.068
m_h^*/m_o	0.3	0.81	0.56
Conductivity m_e/m_o	0.12	0.26	0.09
m_h/m_o	0.23	0.38	
Melting point (°C)	937	1415	1238
Intrinsic mobility			
Electron (cm^2 V^{-1} sec^{-1})	3900	1350	8500
Hole (cm^2 V^{-1} sec^{-1})	1900	480	400




معجم المصطلحات
إنجليزى - عربى

المصطلح	الترجمة
abrupt junction	وصلة مبتورة
absorption coeffcient	معامل الأمتصاص
acceptors	مستقبلات
accumulation	تراكم (تكدس)
active biasing mode	نمط انحياز نشط
alkali ions	أيونات قلوية
alloys	سبائك
aluminum gallium arsenide	الومنيوم زرنيخيد الجاليوم
amorphous	امورفى
amorphous - si	سيليكون امورفى
amphoteric dopant	شائبة امفوتيرية
amplification factor	معامل الكسب
antimony (sb)	انتيمون
antreflection coating,	طلاء غير عاكسى
asymmetrical junction	وصلة غير متماثلة
Auger	اوجيه
Auger recombination	التئام اوجيه
avalanching	انهمار
band bending	انحناء نطاق
band gap	فجوة نطاق
band-to-band	نطاق لنطاق

barrier heights	حائط (الجهد)
base	قاعدة
base transit time	زمن عبور قاعدة
base transport factor	معامل انتقال قاعدة
basic postulates	فرضيات أساسية
bcc	مكعب متمركز الجسم
bias voltage	جهد انحياز
bipolar gunction transistor.(bjt)	ترانزستور ثنائى القطب الوصلى
blackbody radiation	إشعاع جسم أسود
Bohr atom model	نموذج ذرة بوهر
bonding model	نموذج روابط
breakdown	انهيار
breakdown voltage	جهد الانهيار
built- in voltage	جهد مبيت
buried junction	طبقة مدفونة
c-v characteristics	منحنيات مميزة سعة - جهد
capacitance	سعة
capture coeffcients	معاملات الاصطياد (الأسر)
carriers	حاملات
carrier population	إسكان حاملات
carrier properties	خواص الحاملات
CdS photoconductor	موصل ضوئى من كبرتيد الكادميوم
channel conductance	ناقلية قناة
charge density	علاقة تعادل الشحنة
chemical vapor deposition (CVD)	ترسيب بخر كيميائى
collector	مجمع
collector current	تيار المجمع

common base	قاعدة مشتركة
common collector	مجمع مشترك
common emitter	باعث مشترك
compensated	معوض
compensated semicinductor	شبه موصل معوض
composition	تكوين
compound semiconductors	اشباه موصلات مركبة
compounds	مركبات
concentration calculation	حسابات التركيز
concentration formulas	صيغ التركيز
conductance	مواصلة (ناقلية)
conduction band	نطاق توصيل
conductivity	توصيلية
confinement	حبس (تقييد) (حصر)
continuity equations	معادلات الاتصال
core electrons	إلكترونيات اللب - (القلب)
core,atomic	اللب (القلب) الذرى
covalent bonding	رابطة تساهمية
crystal growth	تنمية بلّورة
crystal lattices	شبيكات بلّورية
crystalline	بلّورى
current density	كثافة التيار
current diffusion	تيار انتشار
cutoff biasing mode	نمط انحياز قطع
cutoff frequency	تردد القطع
Czochralski method	طريقة تشوكراسكى
defect	عيب

definition	تعريف
degenerate	مفككة
degenerate semiconductor	شبه موصل مفكك
degrenerate states	حالات مفككة
density of states	كثافة الحالات
depletion	نضوب
depletion approximation	تقريب نضوب
depletion mode	نمط نضوب
depletion region	منطقة (رقعة) نضوب
depletion width	اتساع النضوب
depletion- layer capacitance.	سعة طبقة نضوب
diamond	ماسى
diamond lattice	شبيكة ماسية
die	قالب
dielectric constant	ثابت العزل الكهربى
diffusion	انتشار
diffusion capacitance	السعة الكهربية للانتشار
diffusion coeffcients	معامل الانتشار
diffusion length	أطوال الانتشار
direct	مباشرة
direct semiconductor	شبه موصل مباشر
dislocation	انخلاعات
dopant	مانحات
doping	إشابة (تطعيم)
doping profile	بروفيل (شكل جانبى)الإشابة
dose	جرعة
drain	مصرف

drift	انسياق
drift velocitiy	سرعة انسياق
drive-in	دفع للداخل
dry	جافة
dry etch	حفر
e-k plots	منحنيات E-k (الطاقة كدالة فى عدد الموجة)
eddy current	تيارات دوامية
effective density of states	كثافة الحالات الفعالة
effective mass	كتلة فعالة
Einstein relationship	علاقة اينشتين
electric field	مجال كهربى
electron affnity, 478-565	ألفة إلكترون
electron volt(ev)	إلكترون- فولت
elemental	عنصر مفرد
emitter	باعث
emitter current	تيار الباعث
emitter effciency	كفاءة الباعث
energy band diagram	مخطط نطاق الطاقة
enhancement mode mosfet	نمط (مقوى) محسن
epitaxy	نمو متراص
equations of state	معادلات الحالة
equilibrium conditions	شروط الاتزان
evaporation	تبخير
extrinsic	مكتسبة (عرضية)
extrinsic semiconductor	شبه موصل مكتسب
extrinsic temperature region	منطقة حرارية مكتسبة
fcc	مكعب متمركز الوجه

fcc unit cell	خلية وحدة متمركزة الوجه
Fermi energy	طاقة فيرمى
Fermi function	دالة فيرمى
Fermi level	مستوى فيرمى
Fermi-dirac integral	تكامل فيرمى - دايرك
Fermi-level pinning	تثبيت مستوى فيرمى
Fick,s law	قانون فيك
field effect	تاثير المجال
field emission	انبعاث بالمجال
fill factor	معامل الملىء
fingers	اصابع
flat band	نطاق مسطح
forward bias	انحياز امامى
four-point probe	مجس النقاط الأربع
freeze-out	الطرد بالتجميد
Ga N	نتريد الجاليوم
Ga P	فوسفيد الجاليوم
gain	كسب (تكبير او تضخيم)
gallium arsenide (gaas)	زرنخيد الجاليوم
gallium(ga)	جاليوم
gate	بوابة
germanium(ge)	جرمانيوم
graded field	وصلة مدرجة
heterojunction	وصلة غير متجانسة
heterojunction bipolar	ترانزستور ثنائى القطب غير متجانس الوصلة
holes	شغرات
homojunction laser	ليزر وصله متجانسة

hot-point, probe	مجس (مسبار) النقطة الساخنة
hydrogen atom	ذرة الهدروجين
IV characteristics	مميزات I-V
ideal diode equation	شبه موصل غير مباشر
ideal laser characteristic	المنحنى المميز لليزر مثالى
indexing procedure	طريقة الإدلال، ادلة ميللر
indirect	غير مباشرة
indirect semiconductor	صبة (مصهور)
ingot	تركيز الحاملات الذاتية
injection	حقن
intrinsic	ذاتى
intrinsic	ذاتية
intrinsic carrier concentration	مستوى فيرمى الذاتى
intrinsic fermi level	شبه موصل ذاتى
intrinsic temperature region	المنطقة الحرارية الذاتية
inversion	انقلاب
inversion layer	طبقة انقلاب
inverted biasing mode	نمط انحياز معكوس (مقلوب)
ion implantaion	غرس ايونى
isoelectronic trap	مصيدة تساوى إلكترونى
junction capacitance	سعة وصلة
junction field effect transistor (JFET)	ترانزستور تاثير المجال بوصلى
laser	ليزر
laser amplifier	مكبر ليزر
laser oscillator	مذبذب ليزر
lasing	تليزر
lattice	شبيكة

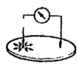
lattice constant	ثابت شبيكة
lattice-matched system	منظومة شبيكة متوافقة
light emitting diode.	ثنائى باعث للضوء
lithography	نقش حجرى
low-level ingection	حقن منخفض المستوى
majority carriers	شحنات الأغلبية
masks	قناع
mean free time	زمن حر متوسط
metallurigical junction	وصلة ميتالورجية
metastable	شبه مستقر
metastable	ضعيف الاستقرار
Miller directions	اتجاهات أدلة ميللر
Miller indices	ادلة ميللر
minority carrier diffusion equations	معادلات انتشار حاملات اقلية
minority carrier diffusion lengths	أطوال انتشار حاملات اقلية
minority carrier lifetime	زمن بقاء (حياة) حاملات اقلية
minority carriers	شحنات الأقلية
mobility	حركية
modulation doped	إشابة معدلة
molecular beam epitaxy (MBE)	نمو متراص بالشعاع الجزيئى
momentum	كمية حركة
n^+ - material	مادة نوع n^+
n-type material	مادة نوع n
narrow - base diode	ثنائى ضيق القاعدة
nearest neighbors	اقرب جيران
nondegenerate	غير مفككة
nondegenerate semiconductor	شبه موصل غير مفكك

notch	حز
np product	حاصل الضرب np
ohmic contact	تلامس اومى
open circuit voltage	جهد دائرة مفتوحة
optical communication	اتصالات بصرية
optical fibers	الياف بصرية
oxidation	اكسدة
p^+ - material	مادة p^+
p-type material	مادة نوع p
Pauli exclusion principle	مبدا استبعاد باولى
periodic table	جدول دورى
perturbation	قلقلة (اضطراب)
phonon	فونون
photo detectors	كواشف ضوئية
photoconductor	موصل ضوئى
photocurrent	تيار ضوئى
photodetector	كاشف ضوئى
photodiode	دايود ضوئى
photogeneration	توليد ضوئى
photon	فوتون
photoresist	مقاوم ضوئى
phototransistor	ترانزستور ضوئى
pinch-off	قطع تخصرى
pn junction	وصلة pn
point defect	عيب نقطى
polycrystalline	متعدد البلورة
polycrystalline si (polysilicon)	سيليكون متعدد البللورة

polysilicon emitter	باعث متعدد التبلور
polysilicon emitter (BJT)	باعث متعدد السيليكون
population	إسكان (تعداد)
population density	كثافة إسكان
population inversion	إسكان مقلوب
potential	جهد
potential energy	طاقة جهد
predeposition	قبل الترسيب (ترسيب مسبق)
primitive umit cell	خلية وحدة اولية
projected range	مدى إسقاطى
pumping	ضخ
punch- through	اختراق كلى
purity	نقاء
quantization concept	مفهوم الكم
quantum mechanics	ميكانيكا الكم
quantum-well laser	ليزر بئر كمى
quasi-fermi levels	اشباه مستويات فرمى
R-G center (indirect)	مركز (R - G) (غير مباشر)
recombination-generation (R- G)	التئام (إعادة التئام) توليد
refractive index	معامل انكسار
resistivity	مقاومية
revearse bias	انحياز عكسى
ruby laser	ليزر الياقوت
saturation	تشبع
scattering	تشتت (إستظارة)
Schottky	شوتكى
Schottky barrier lowering	حاجز شوتكى

Schrodinger wave equation	معادلة موجه شرودنجر
seed crystal	بذرة بللورة
semiconductor laser	ليزر شبه موصل
semiconductors	اشباه موصلات
sheet resistivity	مقاومية صفحية
short circuit current	تيار دائرة مقصرة
silicon (Si)	سيليكون
silicon purification	تنقية السيليكون
simple cubic	مكعب بسيط
single crystal formation	تكوين بلورة احادية
solar cell	خلية شمسية
solar spectral irradiance	استضاءة طبيعية شمسية
space charge region	منطقة شحنة فراغية
sputtering	نفث
static characteristice	منحنيات مميز ساكنة
steady state	حالة مستقره
stimulated emission	إشعاع مستحث (محفز)
structure	بنية
substrate	ركيزة
temperature dependence	اعتادية على درجة الحرارة
textured surface	سطح منمش
thermal motion	حركة حرارية
three-level system	منظومة ثلاثية المستويات
threshold current	تيار العتبة
total current	تيار كلى
transconductance	ناقلية متعدية
transistor	ترانزستور

transistor parameters	وسائط (بارامترات) الترانزيستور
ultraviolet	فوق بنفسجية
unit cell	خلية وحدة
vacumm micro electronics	إلكترونيات دقيقة مفرغة
valence band	نطاق التكافؤ
valence electrons	إلكترونات التكافؤ
velocity, saturation	تشبع سرعة
wafer	رقاقة
wet	مبتلة
xenon flash lamp	مصباح وميض الزينون
Zener - breakdown	إنهيار زينر
zincblende	زنكبلند
zincblende unit cell	خلية وحدة زنكبلند

كشاف المصطلحات

المراجع



1 - R . F. Pierret, Semicondvctor Device Fundamentals, Addison - Wesley Pubishing Company, New York, © 1996.

2 - G . Parper, Introductory Semiconductor Device Physics, Prentice Hall, New York, © 1994.

3 - A. M, Ferendeci, Physical Foundations of Solid State and Electron Devices, McGraw Hill, New York, © 1991.

4. R.C. Jaeger, Introduction to Microelectronic Fabrication, Vol. V in the Modular Series on Solid State Devices edited by G. W. Neudeck and R.F. Pierret, Addison - Wesley, Reading, MA, © 1988.

5. D.A. Neamen, Semiconductor Physics and Devices, Basic Principles, Irwin, Homewood, IL, © 1992.

6. R.F. Pierret, Advanced Semiconductor Fundamentals, Vol. VI in the Modular Series on Solid State Devices edited by G.W. Neudeck and R.F. Pierret, Addison-Wesley, Reading, MA, © 1987.

7. W.R. Runyan and K.E. Bean, Semiconductor Integrated Circuit Processing Technology, Addison-Wesley, Reading, MA, © 1990.

8. B.G. Streetman, Solid State Electronic Devices, 4th edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, © 1995.

9. S.M. Sze (editor), VSLI Technology, 2nd edition, McGraw Hill, New York, © 1988.

10. M.S. Tyagi, Introduction to Semiconductor Materials and Devices, John Wiley and Sons, New York, © 1991.

11. A. Bar-Lev, Semiconductors and Electronic Devices, 3rd edition, Prentice Hall, Inc., New York, © 1993.

12. D.H. Havon, Semiconductor Microdevices and Materials, Holt, Rineart and Winston, New York, © 1986.

13. D.L. Pulfrey and N.G. Tarr, Introduction to Microelectronic Devices, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NG, © 1989.

14. C.T. Sah, Fundamentals of Solid-State Electronics, World Scientific, Singapore, © 1991.

15. J. Singh, Semiconductor Devices, an Introduction, McGraw-Hill, New York, ç 1994.

16. S.M. Sze, Semiconductor Devices, Physics and Technology, John Wiley and Sons, New York, ç 1985.

17. E.S. Yang, Microelectronic Devices, McGraw Hill, New York, © 1988.

18. M. Zambuto, Semiconductor Devices, McGraw Hill, New York, © 1989.

رقم الإيداع	٣٠٠٣ / ٢٠٠١
I. S. B. N الترقيم الدولى	977-10-1433-4

دار الفكر العربى

مؤسسة مصرية للطباعة والنشر والتوزيع

تأسست ١٣٦٥ هـ ـ ١٩٤٦م

مؤسسها : محمد محمود الخضرى

الإدارة : ٩٤ شارع عباس العقاد - مدينة نصر - القاهرة

وإدارة التسويق ت: ٢٧٥٢٩٨٤ - ٢٧٥٢٧٩٤ فاكس: ٢٧٥٢٧٣٥

www.darelfikrelarabi.com

.INFO@darelfikrelarabi.com

الإدارة المالية: ١١ ش جواد حسنى ـ القاهرة

ص. ب : ١٣٠ ـ الرمز البريدى ١١٥١١

فاكس : ٣٩١٧٧٢٣ (٠٠٢٠٢)

ت : ٣٩٢٥٥٢٣ ـ ٣٩٢٠٩٥٦.

نشاط المؤسسة

١ ـ طبع ونشر وتوزيع جميع الكتب العربية فى شتى مجالات المعرفة والعلوم

٢ ـ استيراد وتصدير الكتب من وإلى جميع الدول العربية والأجنبية.

تطلب جميع منشوراتنا من فروعنا بجمهورية مصر العربية :

فرع مدينة نصر: ٩٤ شارع عباس العقاد ـ مدينة نصر - القاهرة.

ت ٢٧٥٢٧٩٤ ـ ٢٧٥٢٩٨٤ فاكس ٢٧٥٢٧٣٥

فرع جواد حسنى: ٦ أ شارع جواد حسنى ـ القاهرة

ت ٣٩٣٠١٦٧.

فرع الدقى : ٢٧ شارع عبد العظيم راشد المتفرع من شارع محمد شاهين ـ العجوزة ت ٣٣٥٧٤٩٨

وكذلك تطلب جميع منشوراتنا من وكيلنا الوحيد بالكويت والجزائر

مؤسسة دار الكتاب الحديث

هذه السلسلة

لقد أضحى أمر تعريب العلم والتعليم ضرورة من ضرورات النهضة العلمية والتقنية التى تنشدها أمتنا العربية والإسلامية لكى تستأنف مسيرتها الحضارية بلغة القرآن الكريم الذى حفظها قوية حية فى النفوس على الرغم من الوهن الذى أصاب أهلها.

ودار الفكر العربى ـ من جانبها ـ قد استشعرت خطورة تأخير هذا المشروع الحضارى الكبير، فسعت جاهدة إلى تحقيق الهدف النبيل، وشرعت فى إعداد « سلسلة مراجع العلوم الأساسية » فى مجالات الكيمياء والفيزياء والرياضيات والفلك والعلوم الجوية والجيولوجيا وعلوم الحياة، بحيث تخاطب قارئ العلوم بصورة عامة، وطلاب المرحلتين الثانوية والجامعية على وجه الخصوص.

وقد عهدت دار الفكر العربى بالمسئولية العلمية إلى هيئة استشارية تتولى التخطيط لإصدار هذه السلسلة، واستكتاب أهل الخبرة والاختصاص من علماء الأمة ومفكريها، ومناقشة الأعمال المقدمة قبل صدورها.

هذا الكتاب

يتوجه محتوى هذا الكتاب « فيزياء أشباه الموصلات » لمخاطبة المهتمين بالإلكترونيات عامة وطلاب الهندسة والعلوم والتربية والتكنولوجيا بشكل خاص. وقد كتب باللغة العربية إثراءً للمكتبة العربية فى هذا المجال من المعرفة. ويشرح الكتاب بطريقة مبسطة ومتدرجة البنية الأساسية لأشباه الموصلات، الذاتية منها والعارضة، وما يحكمها من قوانين فيزيائية، ثم يقدم شرحًا وافيا لنبائط أشباه الموصلات وخصائصها الفيزيائية واستخداماتها. ويتناول بعد ذلك موضوع البصريات الكمية وعناصرها الأساسية من النبائط الكاشفة أو المشعة للضوء والليزر مع بيان للتطبيقات الشائعة فى هذا المجال.

وقد اختيرت المحتويات لكى تلبى احتياجات مقرر دراسى مرجعى للطلاب الدارسين لهذا الفرع من الفيزياء والقائمين على تدريسه.



أ.د. شريف أحمد خيرى

* أستاذ الفيزياء - كلية العلوم جامعة القاهرة.
* سكرتير تحرير المجلة العربية للفيزياء التطبيقية والتعليم، تصدرها الشبكة العربية لتعليم الفيزياء.
* عضو مجلس إدارة الجمعية المصرية لعلوم الجوامد وتطبيقاتها.
* أشرف على العديد من رسائل الماجستير والدكتوراه بجامعة القاهرة ونشر العديد من البحوث فى مجال فيزياء الجوامد.



أ.د. حسن حسين حسن

* أستاذ مساعد بالمعهد العالى للتكنولوجيا
* حصل على درجة الدكتوراه ... للتكنولوجيا بالولايات المتحدة ... ١٩٨٦م.
* عمل بأقسام ... جامعة القاهرة ...
* أعير للعمل بجامعة أم القرى بالمملكة السعودية.
* له أبحاث منشورة فى مجال أشباه الموصلات

تطلب جميع منشوراتنا من وكيلنا الوحيد بالكويت والجزائر **دار الكتاب الحديث**